

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Electrotécnica

SENSOR DE DIRECÇÃO LUMINOSA PARA SEGUIMENTO SOLAR

Por:  
David Coimbra da Costa Gomes

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor João Martins  
Co-Orientador: Doutor Luís Miguel Pereira Pina

LISBOA  
(2010)



## **Agradecimentos**

Gostaria de expressar a minha gratidão a todas as pessoas que, directa ou indirectamente, me ajudaram na execução desta tese.

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador, professor Doutor João Martins, por todo o acompanhamento e orientação no decorrer do trabalho, pelas importantes sugestões feitas, bem como pelo material disponibilizado.

Deixo também uma palavra de agradecimento ao Doutor Luís Pina por toda a orientação feita desde o primeiro dia e pelo importantíssimo papel que teve no decurso de todo este trabalho. Um obrigado também à empresa WS-Energia S.A, bem como a todos os seus colaboradores, pela óptima recepção e colaboração.

*Last but not least*, gostaria de agradecer à minha família e amigos, em especial aos meus pais e às minhas irmãs Diana e Rita.



# Índice

Agradecimentos.....	III
Índice de Figuras .....	IX
Índice de Tabelas.....	XIII
Resumo.....	XV
Abstract .....	XVII
Acrónimos .....	XIX
1. Introdução .....	1
1.1 Âmbito.....	1
1.1.1 Energia Solar .....	2
1.1.2 Energia solar fotovoltaica.....	3
1.1.3 Sistemas fotovoltaicos.....	4
1.1.4 Concentração fotovoltaica.....	7
1.2 Motivação.....	9
1.3 Contribuições .....	11
1.4 Organização do documento .....	13
2. Estado da arte .....	15
2.1 Sistemas de seguimento solar.....	15
2.1.1 Tipos de seguidores solares quanto aos eixos .....	15
2.1.2 Tipos de seguidores solares quanto à tecnologia.....	18
2.1.2.1 Erros associados a cada um dos tipos de seguimento.....	18
2.1.2.1.1 Seguimento Astronómico .....	18
2.1.2.1.2 Seguimento com sensores de luz.....	21
2.2 Sensores de luz para seguimento solar .....	22
2.2.1 Sistemas com dispositivos fotossensíveis simples .....	28
2.2.1.1 Sensores directamente direccionados para o sol .....	28
2.2.1.2 Sensores com um desfasamento angular entre si .....	29

2.2.2	Sistemas com sensores de pixéis activos (APS) ou com dispositivo de quatro quadrantes ..	29
2.2.3	Sistemas “Machine Vision” .....	30
2.3	Robótica Sun Gravity Control ® .....	31
2.4	Protocolo de comunicação I2C .....	32
3.	Desenvolvimento dos sensores de luz .....	35
3.1	Sensor de precisão .....	35
3.1.1	Dispositivo utilizado.....	35
3.1.2	Modo de funcionamento.....	36
3.1.2.1	Procedimento para encontrar o Sol.....	36
3.1.2.2	Procedimento para encontrar o ponto para onde está direccionada a estrutura .....	39
3.1.2.3	Procedimento para encontrar o erro entre o sol e a estrutura de seguimento .....	40
3.1.3	Interface do sensor para o utilizador.....	41
3.2	Sensor para seguimento .....	44
3.2.1	Análise de dispositivos fotossensíveis.....	44
3.2.1.1	Fotoresistência.....	45
3.2.1.2	Fotodíodo.....	47
3.2.1.3	Fototransístor .....	49
3.2.2	Testes a dispositivos .....	50
3.2.2.1	Teste à variação de intensidade de luz.....	53
3.2.2.1.1	Com uma resistência em série de 10K $\Omega$ .....	54
3.2.2.1.2	Com uma resistência em série de 1K $\Omega$ .....	55
3.2.2.1.3	Com uma resistência em série de 500 $\Omega$ .....	56
3.2.2.1.4	Conclusão acerca do teste de variação de intensidade de luz .....	56
3.2.2.2	Teste à variação do ângulo de incidência .....	57
3.2.2.2.1	Conclusão acerca do teste à variação do ângulo de incidência.....	58
3.2.2.3	Teste em condições reais .....	58
3.2.2.3.1	Conclusões acerca do teste .....	59
3.2.2.4	Conclusões acerca de todos os testes.....	60
3.2.3	Placa de aquisição de dados.....	61
3.2.3.1	Conversor Analógico-Digital .....	62

3.2.3.2	Funcionamento da placa de aquisição de dados .....	63
3.2.4	Construção do sensor .....	65
3.2.5	Modo de funcionamento.....	68
3.2.6	Parâmetros do sensor.....	72
4.	Resultados .....	75
4.1	Estrutura de seguimento utilizada .....	75
4.2	Céu nublado .....	78
4.3	Céu limpo .....	82
4.4	Condições adversas .....	83
4.4.1	Céu muito nublado .....	83
4.4.1.1	Robustez às nuvens .....	86
4.4.2	Comportamento ao anoitecer .....	88
4.4.3	Comportamento ao amanhecer.....	91
5.	Conclusões .....	95
5.1	Síntese .....	95
5.2	Conclusão.....	95
5.3	Trabalho futuro.....	96
6.	Bibliografia .....	97
Anexos.....		99
	Manual de instruções do sensor de precisão .....	101
	Manual de instruções da placa de aquisição de dados.....	107
	<i>Comparison between astronomical and light sensor feedback sun-tracking algorithms.....</i>	<i>113</i>





## Índice de Figuras

Figura 1.1: Previsão da utilização da energia primária no futuro (Responding to climate change, 2009)	3
Figura 1.2: Central de energia solar fotovoltaica de Serpa (portal de moura, 2010).....	4
Figura 1.3: Esquema de a) sistema ligado à rede e b) sistema autónomo .....	5
Figura 1.4: Comparação um sistema fixo e um sistema de seguimento em dois eixos (Quaschnig, 2005) .....	6
Figura 1.5: Esquematização da tecnologia de concentração fotovoltaica .....	7
Figura 2.1: Comparação de tipos de seguimento na Europa (Thomas Huld, n.d.).....	17
Figura 2.2: Esquema de uma fonte de erro da leitura da gravidade .....	19
Figura 2.3: Esquema de possíveis erros na montagem.....	19
Figura 2.4: Cadeia de erros no seguimento astronómico .....	20
Figura 2.5: Exemplo de possível erro de desfasagem entre o sensor e a estrutura.....	21
Figura 2.6: Cadeia de erros no seguimento com sensores de luz .....	22
Figura 2.7: Esquema do sistema (Greene & Tan, 1988) .....	23
Figura 2.8: Esquema do sensor utilizado por Huang em 1996.....	24
Figura 2.9: Sensor de quatro quadrantes (Roth, Georgiev, & Boudinov, 2004) .....	25
Figura 2.10: Esquema do sensor utilizado (Liebe, 2004).....	25
Figura 2.11: Esquema do sensor utilizado (Bingol, Altinta, & Oner, 2006) .....	26
Figura 2.12: Fotografia dos sistemas de seguimento solar e estacionário (Bingol, Altinta, & Oner, 2006) .....	26
Figura 2.13: Esquema do sistema (Oliveira, 2008) .....	27
Figura 2.14: Fotografia e esquema do sensor [www.greenmountainengineering.com] .....	27
Figura 2.15: Esquema de disposição de sensores.....	28
Figura 2.16: Esquema de disposição de sensores.....	29
Figura 2.17: Esquema de disposição de sensores.....	29
Figura 2.18: Procura do centro do sol através de um programa Matlab®.....	30
Figura 2.19: Robótica Sun Gravity Control® .....	31
Figura 2.20: Esquema exemplificativo da comunicação I2C .....	32
Figura 2.21: Sequências Start e Stop.....	33
Figura 2.22: Exemplo de escrita no pic18f4420 [datasheet] .....	33
Figura 2.23: Exemplo de leitura do pic18f4420 [datasheet] .....	34
Figura 3.1: a) Webcam eFace1300. b) Sensor de precisão .....	35
Figura 3.2: Efeito da conversão para uma imagem binária .....	36

Figura 3.3: Efeito da aplicação do filtro de mediana.....	37
Figura 3.4: Esquema da marcação dos componentes ligados.....	37
Figura 3.5: Fluxograma do programa elaborado em Matlab .....	38
Figura 3.6: Centro do sol encontrado .....	39
Figura 3.7: Ilustração da calibração do sensor.....	40
Figura 3.8: Ilustração dos erros .....	40
Figura 3.9: Possível não-linearidade em gamas diferentes da imagem .....	41
Figura 3.10: Aspecto da interface.....	42
Figura 3.11: printscreen do ecrã podendo ver a posição do sol em pixéis e a posição da estrutura em graus .....	44
Figura 3.12: Espectro da radiação solar (Department of Energy, 2010) .....	45
Figura 3.13: Símbolo da fotoresistência .....	46
Figura 3.14: Esquema de funcionamento da fotoresistência .....	46
Figura 3.15: a) Esquema do divisor de tensão b) curva da tensão <b>Vout</b> em ordem ao valor de <b>R2</b> .....	47
Figura 3.16: Símbolo do fotodíodo (Scherz, 2000) .....	47
Figura 3.17: Esquema de funcionamento do fotodíodo.....	48
Figura 3.18: Linearidade entre a intensidade de luz e a corrente produzida .....	48
Figura 3.19: Possível montagem para medir a intensidade de luz; adaptado de (Scherz, 2000) .....	48
Figura 3.20: Esquema de funcionamento do fototransístor .....	49
Figura 3.21: Possível montagem para medir a intensidade de luz (Scherz, 2000) .....	49
Figura 3.22: Esquema de montagem a) fototransístor b) fotoresistência c) fotodíodo.....	50
Figura 3.23: Arduino (arduino, 2010) .....	51
Figura 3.24: Associação gráfica entre os valores dos dispositivos e do luxímetro .....	52
Figura 3.25: Montagem para fazer a aquisição de dados através do Arduino .....	53
Figura 3.26: Teste à variação de intensidade de luz .....	54
Figura 3.27: Teste à variação de intensidade de luz com uma resistência de $10K\Omega$ .....	54
Figura 3.28: Teste à variação de intensidade de luz com uma resistência de $1K\Omega$ .....	55
Figura 3.29: Teste à variação de intensidade de luz com uma resistência de $500\Omega$ .....	56
Figura 3.30: Imagem do teste de variação do ângulo de incidência .....	57
Figura 3.31: Teste de variação do ângulo de incidência com uma resistência de $1K\Omega$ .....	58
Figura 3.32: Fotografia do céu no dia do teste em condições reais .....	59
Figura 3.33: Teste com resistências de $1K\Omega$ .....	59
Figura 3.34: Sensor baseado em comparação de dispositivos .....	60
Figura 3.35: Duas hipóteses para sensores: a) com um fototransístor b) Com um fototransístor e quatro fotoresistências .....	61
Figura 3.36: Esquema global do sistema .....	62
Figura 3.37: Fotografia de uma das placas desenvolvidas .....	62
Figura 3.38: Esquema do conversor analógico-digital .....	63

Figura 3.39: Fluxogramas de funcionamento da placa de aquisição de dados.....	64
Figura 3.40: a) Esquema do sensor b) fotografia do sensor montado na estrutura.....	65
Figura 3.41: a) Esquema interior do sensor para seguimento b) esquema de ligações .....	65
Figura 3.42: Exemplo de resultado do teste .....	66
Figura 3.43: Gráfico dos sensores não calibrados.....	67
Figura 3.44: Gráfico dos sensores calibrados.....	67
Figura 3.45: Sensores antes e depois de calibrados.....	68
Figura 3.46: Sensores antes e depois de calibrados na zona de maior luminosidade.....	68
Figura 3.47: Esquema de precisões .....	69
Figura 3.48: Esquema da ordem a enviar ao motor.....	70
Figura 3.49: Valor relativo de luminosidade nos dois eixos .....	71
Figura 3.50: Valores de Este (vermelho) e Oeste (azul) .....	72
Figura 3.51: Valores de Norte (azul) e Sul (vermelho).....	72
Figura 3.52: Ilustração do efeito directo das variáveis de precisão.....	73
Figura 4.1: a) Imagem do seguidor. b) Tubos de precisão. ....	75
Figura 4.2: Ilustração do tubo de maior precisão .....	76
Figura 4.3: Sombra causada pelos tubos de precisão a) 1º b) 3º. ....	76
Figura 4.4: Sensor da webcam calibrado manualmente: a) visto no sensor de precisão b) visto nos tubos de precisão .....	77
Figura 4.5: Fotografia do céu .....	78
Figura 4.6: Andamento temporal no eixo horizontal .....	79
Figura 4.7: Andamento temporal no eixo horizontal com a trajectória real do sol .....	79
Figura 4.8: Pormenor do ajuste de posição .....	80
Figura 4.9: Andamento temporal no eixo vertical.....	80
Figura 4.10: Andamento temporal no eixo horizontal com a trajectória real do sol .....	81
Figura 4.11: Pormenor do ajuste de posição no eixo vertical .....	81
Figura 4.12: Fotografia do céu no momento do teste.....	82
Figura 4.13: Andamento temporal no eixo horizontal .....	83
Figura 4.14: Andamento temporal no eixo vertical.....	83
Figura 4.15: Fotografia do céu no momento do teste.....	83
Figura 4.16: Efeito das nuvens no eixo vertical .....	84
Figura 4.17: Efeito das nuvens no eixo horizontal.....	85
Figura 4.18: Comparação com o movimento efectuado e a trajectória do sol .....	85
Figura 4.19: Valor dos sensores .....	86
Figura 4.20: Robustez às nuvens.....	87
Figura 4.21: Fotografia do céu na noite do teste .....	88
Figura 4.22: a) valor dos sensores e b) movimento horizontal.....	89
Figura 4.23: Variação da posição da estrutura ao anoitecer .....	89

Figura 4.24: Luzes de presença no local.....	90
Figura 4.25: Sensor sob influência de luzes externas .....	90
Figura 4.26: Fotografia do seguidor ao amanhecer .....	91
Figura 4.27: Andamento temporal no eixo horizontal.....	91
Figura 4.28: Pormenor do erro dado pelo sensor de precisão.....	92
Figura 4.29: Andamento temporal no eixo vertical .....	92
Figura 4.30: Recta de precisão .....	93

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Exemplo de escrita no Excel, em graus.....	43
Tabela 2: Associação entre valores dos dispositivos e do luxímetro .....	52
Tabela 3: Tabela de valores dos dispositivos a diferentes níveis de luminosidade.....	66



## Resumo

Neste trabalho, resultante de uma parceria entre a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a WS-Energia S.A., é proposto o desenvolvimento de um sensor de direcção luminosa para seguimento solar.

Procedeu-se ao desenvolvimento de dois sensores de luz para efeitos de seguimento solar, sendo um deles para seguimento, propriamente dito, com fins comerciais num futuro próximo, e outro para avaliar o desempenho do sistema de seguimento.

O primeiro consiste num sensor que faz o seguimento solar com base na comparação de quatro dispositivos fotossensíveis simples. O sensor mostrou ter uma precisão de, aproximadamente,  $0.5^\circ$ , em dias pouco nublados, e uma robustez às nuvens bastante satisfatória.

O outro sensor desenvolvido destina-se a avaliar a precisão do sistema em funcionamento. Este sensor, que tem como base uma simples webcam existente no mercado, funciona através de processamento de imagem. Este processamento de imagem consiste em encontrar o centro do sol na imagem captada pela webcam, assim como a posição para onde a estrutura está direccionada. Esta ferramenta mostrou-se muito útil na avaliação do desempenho do seguimento, disponibilizando o seu erro, em graus e em ambos os eixos.

No decorrer do trabalho é feita também uma análise comparativa entre dois tipos de seguimento solar: o seguimento astronómico, método actualmente utilizado pela WS-Energia S.A., e o seguimento à base de sensores de luz, na qual o bom desempenho de ambos os sensores desenvolvidos se mostrou de grande importância.

Parte deste trabalho foram publicadas num artigo e apresentadas na conferência “*Concentrating Photovoltaic Optics and Power*”, decorrida na Alemanha, em Bremerhaven, de 20 a 22 de Outubro de 2010. O artigo encontra-se no anexo III.

**Palavras-Chave:** sensor de luz, seguimento solar, processamento de imagem, sistemas fotovoltaicos





## Abstract

The main aim of this project is to develop a range of light sensors to be applied in Sun tracking Systems. The project is a partnership between Faculdade de Ciências e Tecnologia of Universidade Nova de Lisboa and WS-Energia S.A.

Two light sensors were developed. The first one is to be soon commercialized by WS-Energia® and the aim of the other one is to provide accurate measurements about the sun tracking error, so the accuracy of the system can be quantified.

The first mentioned consists on an economic sensor that tracks the sun by comparing four simple photo-sensible devices. The sensor showed a precision of, more or less,  $0.5^\circ$  in sunny days and a good behave working in cloudy days.

The other developed sensor consists, as already told, on a device to evaluate the precision of the sun tracking system. This sensor consists on a simple webcam that can be easily found on the market and its functionality is based on image processing. The aim of the image processing is to find the centre of the sun, on the image, and also the position where the system is pointing to. This tool proved to be very useful on the evaluation of the tracking accuracy, providing its error, on the two axes, in degrees.

In this document, a comparison between astronomical and light sensor-based sun-tracking methods was made, in which, the reliability of both developed sensors was crucial.

This work was published in an article and presented in the conference “*Concentrating Photovoltaic Optics and Power*”, in Bremerhaven, Germany in October of 2010.

**Keywords:** light sensor, sun tracking, image processing, photovoltaic systems



## **Acrónimos**

AC corrente alternada (*Alternating Current*)

ACK bit de reconhecimento no protocolo I2C (*Acknowledge bit*)

ADC conversor analógico-digital (*Analog-to-Digital Converter*)

APS sensor de pixéis activos (*Active Pixel Sensor*)

CCD sensor para captação de imagens (*Charge-Coupled Device*)

DC corrente contínua (*Direct Current*)

I2C protocolo de comunicação (*Inter-Integrated Circuit*)

LDR fotoresistência (*Light Dependent Resistor*)

LSB bit menos significativo (*Least Significant Bit*)

NACK bit de não-reconhecimento no protocolo I2C (*Non-Acknowledge bit*)

PIC controlador programável (*Programmable Interrupt Controller*)

SCL linha de *clock* no protocolo I2C (*Serial Clock Line*)

SDA linha de dados no protocolo I2C (*Serial Data Line*)



## **1. Introdução**

Neste capítulo é feita uma breve introdução ao trabalho realizado. Este é dividido em quatro subcapítulos tais como o âmbito da tese, a motivação, as contribuições feitas e a organização do documento.

O âmbito da tese consiste num pequeno resumo do panorama actual em termos de fontes de energia bem como uma pequena introdução à energia solar e, mais especificamente, à energia solar fotovoltaica. Também nesta divisão é feita uma pequena alusão às vantagens de fazer seguimento solar para melhorar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

O subcapítulo seguinte consiste na motivação para a realização deste trabalho. Aqui são introduzidos os dois modos mais utilizados para fazer seguimento solar e é sucintamente explicada a necessidade de desenvolver um sensor de luz para seguimento solar.

As contribuições constituem um subcapítulo no qual são referidos os contributos feitos na realização deste trabalho e, finalmente, é apresentada a organização do documento onde cada capítulo é, muito sucintamente, resumido.

### **1.1 Âmbito**

Segundo Volker Quaschnig, as fontes de energia actualmente utilizadas são as principais responsáveis pela destruição do ambiente que, a par com o aquecimento global, constitui um dos principais problemas cuja resolução constitui um desafio para este século (Quaschnig, 2005). Numa altura em que o preço dos combustíveis fósseis está a subir a uma elevadíssima taxa, a aprovação pública destas fontes está cada vez a decair cada vez mais (Responding to climate change, 2009) e a procura de energia prevista para o futuro é enorme, a atenção tem-se virado cada vez mais para a necessidade de alterar o paradigma da produção energética, através da substituição das fontes de energia, pois o panorama energético mundial é, claramente, não sustentável (Quaschnig, 2005).

A substituição de fontes de energia convencionais por outras fontes de energia tem crescido de forma considerável nos últimos anos. Esta substituição deve-se em parte, às influências negativas causadas pela utilização dos combustíveis fósseis mas também devido ao facto de as suas reservas estarem a escassear. Entre as propostas criadas para fortalecer o mundo onde vivemos está a “energia verde”,

energia gerada a partir de recursos ambientais renováveis de modo a ter um panorama energético sustentável.

São exemplo de fontes de energia renovável a energia eólica, a energia das ondas, a energia geotérmica e a energia solar, entre outras.

### **1.1.1 Energia Solar**

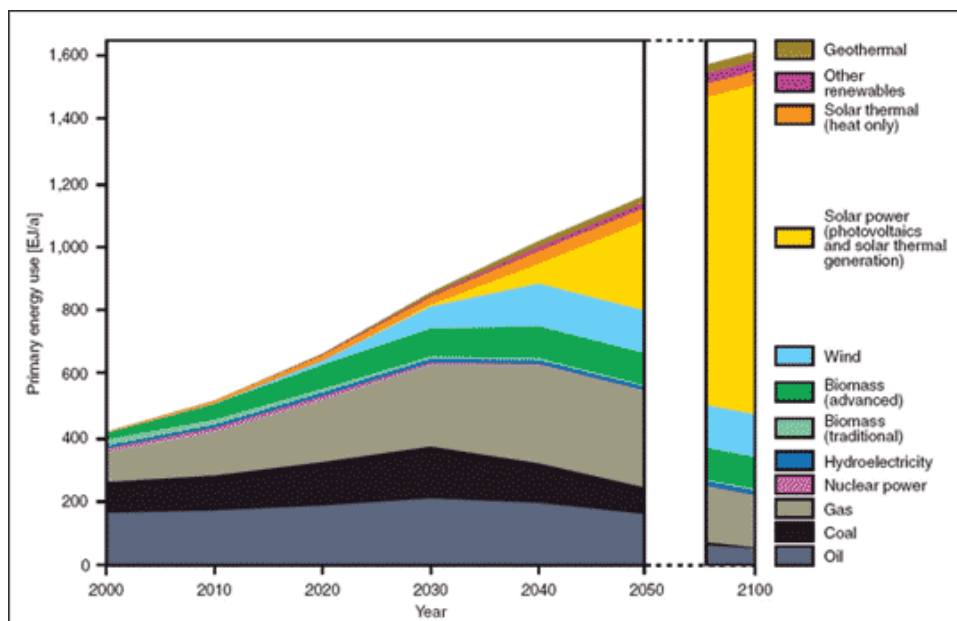
O interesse pela energia solar é fácil de compreender. Para além de estar disponível a nível global, é uma fonte de energia limpa, gratuita e praticamente inesgotável. A palavra “praticamente” deve estar presente pois o sol, na realidade, não é inesgotável. Segundo Janet Ramage, o sol diminui em cerca de quatro milhões de toneladas por segundo, sendo contudo, necessários ainda vários milhões de anos para perder 0,000001 da sua massa actual (Ramage, 2003). Por outro lado, segundo Volker Quaschnig, anualmente, cerca de  $1,08 \times 10^{18}$  KWh de energia solar atinge a superfície terrestre, sendo este valor cerca de 10 mil vezes superior à procura anual mundial de energia primária (Quaschnig, 2005). Ou seja, bastaria utilizar uma pequeníssima parte da energia solar que atinge o nosso planeta para satisfazer a procura energética total da humanidade.

Assim sendo, o sol pode ser considerado uma fonte que, para além de “inesgotável” e abundante, é também uma fonte limpa, pois não é poluente, o que, nos dias de hoje, é uma prioridade quando se fala em fontes de energia.

Existem diversas tecnologias que utilizam a energia solar, tais como a energia solar térmica ou a energia solar fotovoltaica, entre outras.

A energia fotovoltaica revela-se como uma das soluções mais eficientes, devido ao seu longo ciclo de vida, à baixa manutenção que requer, ao funcionamento silencioso e à vasta gama de configurações que possibilita. A energia fotovoltaica pode estar presente em aplicações de miliwatt, como por exemplo em pequenas máquinas de calcular, ou em aplicações de muitos Megawatt de potência, em grandes centrais.

Desde 2004, os mercados fotovoltaicos têm-se desenvolvido rapidamente na Europa, nomeadamente em países como a Alemanha, Espanha, Itália e França (Responding to climate change, 2009), entre outros. Tal crescimento faz com que estudos efectuados indiquem que a energia solar seja a energia primária mais utilizada no futuro, tal como se pode observar na Figura 1.1, que retrata um estudo feito pela *German Advisory Council on Global Change*, em 2003.



**Figura 1.1: Previsão da utilização da energia primária no futuro (Responding to climate change, 2009)**

Como se pode observar pela Figura 1.1, de acordo com o estudo efectuado, a previsão é de um aumento da utilização de combustíveis fósseis até ao ano 2030 mas, a partir desse ano, as previsões apontam no sentido de um decréscimo gradual na utilização destes combustíveis para um crescimento, nomeadamente da energia solar. No ano 2100, o estudo prevê que a energia solar tenha a maior fatia na utilização da energia.

### **1.1.2 Energia solar fotovoltaica**

Fotovoltaico é a junção de duas palavras: photo e Volta. Photo significa luz, vindo do grego (phōs, photós) e Volta, em homenagem ao físico italiano (1745-1827). Por outras palavras, fotovoltaico significa a conversão directa de luz em electricidade (Quaschnig, 2005).

Os sistemas fotovoltaicos utilizam células para converter radiação solar em electricidade. Estas células são dispositivos de um material semi-condutor, normalmente silício, que, quando iluminadas, produz electricidade. A célula é o elemento mais pequeno do sistema fotovoltaico, produzindo, tipicamente, potências na ordem dos 1,5W, correspondentes a 0,5V e 3 A. Tipicamente, as células são ligadas em série e/ou paralelo, formando módulos fotovoltaicos (Castro, 2002).

Na actualidade, os sistemas fotovoltaicos são utilizados em vários tipos de aplicações, nomeadamente em aplicações de média potência (dezenas ou centenas de quilowatt) e de pequena potência (décimas ou unidades de quilowatt) (Castro, 2002).

As aplicações de média potência são utilizadas em electrificação rural, no abastecimento de cargas domésticas em locais sem rede, ou em produção ligada à rede. Por sua vez, as aplicações de pequena potência são aplicadas em relógios, calculadoras, sinais rodoviários e outras aplicações.

Nos últimos anos tem-se observado um enorme crescimento de instalações fotovoltaicas quer autónomas, quer, e sobretudo, ligadas à rede. A Europa tem um lugar de grande relevo na implantação de grandes centrais de geração fotovoltaica (Oliveira, 2008). Por exemplo em Moura, Portugal (Figura 1.2), existe um dos maiores projectos fotovoltaicos do mundo: a central de energia solar fotovoltaica em Amareleja que consiste num sistema de 46MW de potência pico e 35MW de potência de injeção na rede, contando com 2520 seguidores azimutais, com 104 painéis cada um, num total de 250 hectares (portal de moura, 2010).



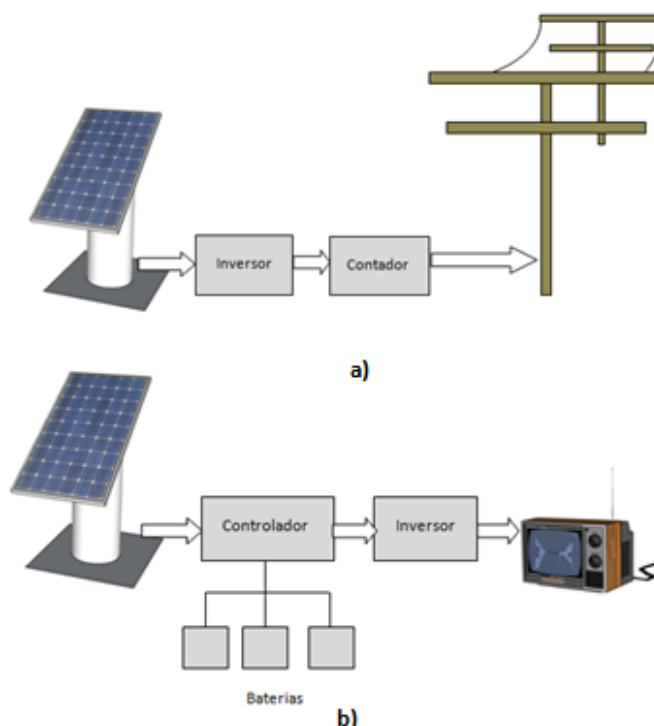
**Figura 1.2:** Central de energia solar fotovoltaica de Serpa (portal de moura, 2010)

### **1.1.3 Sistemas fotovoltaicos**

Os sistemas fotovoltaicos completos podem ser pensados como integrando três subsistemas. No que respeita à geração de energia temos um subsistema composto por células fotovoltaicas agrupadas de forma a formar um módulo fotovoltaico, com o objectivo de converter a luz do sol em electricidade. Já no que diz respeito à utilização da energia, o sistema é composto basicamente pela carga, ou seja, a aplicação da electricidade fotovoltaica. Entre estes dois subsistemas, torna-se necessário um terceiro que permita que a electricidade gerada seja aplicada à carga. Este terceiro subsistema é composto por componentes electrónicos, estruturas de suporte e, se for o caso, equipamento para seguimento solar, como por exemplo, sensores e motores.



Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em dois grandes grupos quanto à sua aplicação. Podem ser sistemas autónomos ou sistemas ligados à rede (Figura 1.3).



**Figura 1.3: Esquema de a) sistema ligado à rede e b) sistema autónomo**

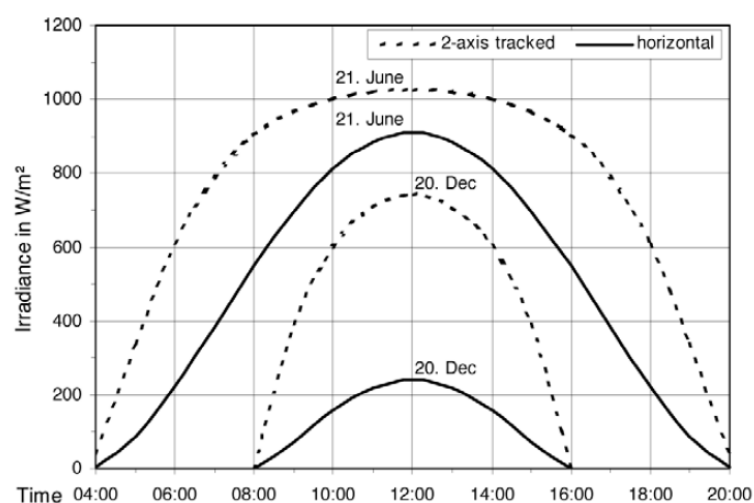
Os sistemas autónomos (Figura 1.3 b) ) são principalmente utilizados em aplicações de pequena potência (décimas ou unidades de quilowatt) ou em aplicações de média potência (dezenas ou centenas de quilowatt) para alimentação de certos locais remotos onde as soluções alternativas convencionais, tais como gerador diesel ou rede eléctrica, têm desvantagens quer financeiras quer ambientais (Castro, 2002). Estes sistemas são constituídos essencialmente por um conjunto de módulos, baterias, um controlador de carga e um inversor, sendo este último necessário apenas se for desejável alimentar cargas AC. Em dias de elevada radiação solar, os módulos produzem energia eléctrica. A energia eléctrica que não for necessária vai ser armazenada em baterias, ou qualquer outro dispositivo de armazenamento de energia. Quando a radiação solar é insuficiente, por ser de noite ou por ser um dia muito nublado, a energia é fornecida também pelas baterias. Para efectuar esta gestão existe o controlador ou regulador de carga que efectua a gestão da carga considerando a radiação disponível e a capacidade das baterias. A tensão disponibilizada quer pelos módulos, quer pelas baterias será uma tensão contínua o que faz com que seja necessário um inversor, que transforma a tensão contínua em alternada, caso seja necessária tensão alternada.

Já nos sistemas ligados à rede (Figura 1.3 a) ), a energia produzida é directamente injectada na rede. Os módulos geram uma tensão contínua e um inversor transforma a tensão contínua proveniente em tensão alternada, com as características necessárias para ser enviada para a rede.

Independentemente do tipo de aplicação, a eficiência dos sistemas fotovoltaicos depende de muitos aspectos, tais como a qualidade das células, da qualidade dos componentes de controlo (tais como reguladores e conversores), do sombreamento sobre as células, da qualidade do seguimento do sol, de forma a maximizar a incidência de raios solares sobre os painéis fotovoltaicos, e muitos outros aspectos. (Mousazadeh, Keyhani, Javadi, Mobli, K, & Sharifi, 2009) (Kalougirou, 1996)

Em geral, a energia desenvolvida nas aplicações fotovoltaicas depende essencialmente da quantidade de energia solar capturada pelas células. Daí a importância que tem sido dada aos sistemas capazes de seguir a trajetória do sol, com o fim de maximizar a quantidade de energia recebida durante todo o dia e todo o ano. Tais sistemas, designados sistemas de seguimento solar, têm demonstrado enormes vantagens em termos de ganhos de energia, quando comparados com sistemas fixos (Lee, Chou, Chiang, & Lin, 2009).

Na verdade, estudos feitos indicam que um sistema de seguimento solar em dois eixos pode resultar num aumento da energia na ordem dos 40% (Mousazadeh, Keyhani, Javadi, Mobli, K, & Sharifi, 2009). A Figura 1.4 mostra uma comparação entre um sistema de seguimento em dois eixos e um sistema fixo no que diz respeito à irradiância captada.



**Figura 1.4: Comparação um sistema fixo e um sistema de seguimento em dois eixos (Quaschnig, 2005)**

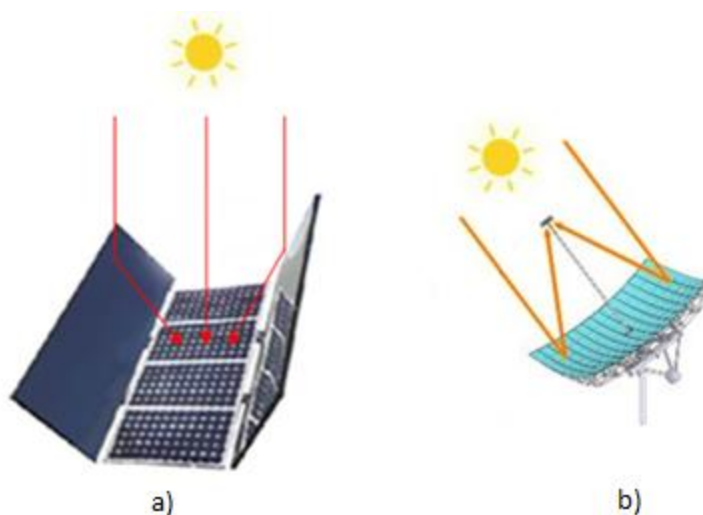
Como se pode observar pela figura, a irradiância captada por um sistema de seguimento em dois eixos (a tracejado) é sempre maior do que a irradiância captada por um sistema idêntico mas fixo (a cheio).

Se um sistema de energia solar segue o sol de modo a que o ângulo de incidência seja, virtualmente, zero, o rendimento cresce substancialmente. Quanto maior for a irradiância numa superfície perpendicular aos raios solares, maior o aumento na energia (Quaschnig, 2005).

### 1.1.4 Concentração fotovoltaica

A indústria fotovoltaica está em rápido crescimento. No entanto, cresceria ainda mais rápido se os custos pudessem ser reduzidos tanto no produto final como no capital investido (Kurtz, 2009), o que se traduziria numa redução do risco de investimento. Uma estratégia para reduzir o custo dos módulos consiste na redução da quantidade de material semi-condutor utilizado. Este é o objectivo da concentração fotovoltaica, pois utiliza ópticas concentradoras para concentrar a luz em pequenas células.

A concentração fotovoltaica consiste em obter maior eficiência a um custo mais reduzido. Tal é conseguido apostando na utilização de materiais mais económicos como o alumínio para reflectir a radiação solar para as células. Desta forma, a célula vai receber radiação directa do sol e, para além disso, vai receber também radiação proveniente dos espelhos que, por sua vez, reflectem o sol. A Figura 1.5 ilustra dois casos de concentração fotovoltaica. Na Figura 1.5 a) encontra-se esquematizada a tecnologia DoubleSun® que consiste em ter um painel fotovoltaico normal, logo, usufruindo de toda a irradiação directa que um sistema sem espelhos teria, mas com o aumento de irradiação proveniente da colocação de espelhos que reflectem o sol para o painel. Na Figura 1.5 b) encontra-se esquematizado um sistema exemplificativo de concentração fotovoltaica que representa um módulo e vários espelhos. Os espelhos estão dispostos de forma a que a irradiação que neles incide seja reflectida para a célula. Nesta configuração, as células absorvem unicamente irradiação proveniente dos espelhos.



**Figura 1.5: Esquematização da tecnologia de concentração fotovoltaica**

Os sistemas de concentração permitem expor os módulos fotovoltaicos a energia solar concentrada, aumentando assim a quantidade de radiação que atinge cada célula. Desta forma, pode-se reduzir a área da célula, que consiste no material mais caro do sistema, e aumentar a área de material concentrador, como espelhos ou lentes, significativamente mais económico.



## 1.2 Motivação

Para conseguir seguir o sol com precisão, de modo a aumentar a produção de sistemas fotovoltaicos, existem, de uma maneira geral, duas formas:

- Seguimento astronómico
- Seguimento com sensores de luz

O seguimento astronómico baseia-se no conhecimento prévio do movimento do sol relativamente à posição do seguidor na Terra. Este tipo de seguimento envolve cálculos e o conhecimento de coordenadas geográficas e temporais.

O seguimento com sensores de luz é baseado em informação proveniente dos sensores, não sendo necessários quaisquer conhecimentos prévios acerca da posição do sol ou da estrutura de seguimento.

Em cada uma das tecnologias de seguimento existem erros e custos associados. No decorrer deste trabalho vão ser explicados, em pormenor, alguns dos erros associados a cada uma das tecnologias. Esta comparação permitirá demonstrar que a tecnologia que utiliza sensores de luz tem menos erros associados, embora possa não ser uma solução robusta para todas as situações.

O objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sensor de luz para seguimento solar. A par deste sensor, é suposto também o desenvolvimento de um sensor preciso para efeitos de testes, tais como avaliar o desempenho do seguimento.



### **1.3 Contribuições**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram desenvolvidas as seguintes aplicações:

- Sensor de luz para seguimento solar
- Sensor de alta precisão com interface para o utilizador

Foi desenvolvido um sensor de luz, com fins comerciais, que utiliza uma placa de aquisição de dados (anexo II) programada e preparada para ler quatro dispositivos fotossensíveis e comunicar, por I2C, com a robótica existente.

Para validação dos resultados experimentais, foi também desenvolvido um sensor de elevada precisão, baseado numa webcam e funcionando através de processamento de imagem, bem como uma interface gráfica para permitir uma fácil e prática utilização do mesmo (anexo I).





## **1.4 Organização do documento**

No capítulo 2 encontra-se o estado da arte, capítulo onde são revistas várias tecnologias utilizando sensores de luz. Neste capítulo encontra-se também uma breve descrição do sistema utilizado pela WS-Energia S.A., assim como uma introdução ao protocolo de comunicação I2C, uma vez que vai ter de ser utilizado para comunicar entre a caixa de robótica da WS- Energia S.A. e cada um dos sensores de luz desenvolvidos.

No capítulo 3 são descritas as contribuições feitas para este trabalho, começando pelo modo de funcionamento e respectiva construção do sensor baseado em processamento de imagem. Neste capítulo é feita também uma breve introdução às fotoresistências, fotodíodos e fototransístores, três candidatos a serem utilizados no desenvolvimento de sensores de luz. São elaborados vários testes envolvendo cada um dos dispositivos, sendo que o objectivo é escolher o dispositivo mais indicado para integrar o sensor de luz a ser desenvolvido. Ainda neste capítulo é descrita a placa de aquisição de dados, uma placa que utiliza o PIC 18f4420 para adquirir dados dos sensores e comunicar com a robótica existente através do protocolo de comunicação I2C. Finalmente é descrita a construção do sensor e o seu modo de funcionamento, bem como o procedimento que deve ser seguido para calibrar os dispositivos integrantes do mesmo, de forma a que estes sejam o mais idênticos possível, garantindo, assim, o bom funcionamento do sensor.

O capítulo 4 é reservado aos resultados obtidos. Neste capítulo é feita uma análise ao comportamento dos sensores em várias situações possíveis, tais como céu limpo ou céu completamente coberto e até amanhecer e anoitecer. É explicado o funcionamento geral do sistema e feita uma análise à precisão conseguida nas diferentes situações.

A conclusão é feita no capítulo 5 onde são referidos os principais resultados obtidos, bem como o trabalho a desenvolver futuramente.

Finalmente, na bibliografia, é apresentada a consulta bibliográfica feita no decorrer deste trabalho.



## **2. Estado da arte**

O presente capítulo tem como objectivo resumir as tecnologias existentes a nível de número de eixos e tecnologias de seguimento. É explicada a razão pela qual se opta pelo seguimento em dois eixos, assim como a necessidade de se optar por seguimento baseado em sensores de luz em detrimento de seguimento astronómico. Também neste capítulo são revistas as principais tecnologias utilizadas a nível de sensores de luz. Para uma bom enquadramento é também feita uma pequena síntese acerca da tecnologia utilizada na empresa, assim como uma pequena introdução ao protocolo necessário para a comunicação entre o sensor a ser desenvolvido e a robótica existente.

### **2.1 Sistemas de seguimento solar**

Conforme referido na introdução, a utilização de um sistema de seguimento solar tem o efeito de um aumento substancial da energia, quando comparado com o da utilização de um sistema estático.

Com os avanços da tecnologia, mais especificamente no campo do controlo de sistemas, observado nas últimas décadas, os custos associados à electrónica e mecânica de estruturas de seguimento solar foi sendo reduzido, o que se traduz num aumento em quantidade e qualidade de estruturas de seguimento solar, com o fim de aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

Um sistema de seguimento solar consiste num sistema capaz de seguir a trajectória do sol. Pode ser utilizado em aplicações fotovoltaicas ou em qualquer outra tecnologia que tenha melhor desempenho quando devidamente orientada para o sol. No caso das aplicações fotovoltaicas, os sistemas de seguimento solar são utilizados de modo a que haja uma maior incidência de raios solares perpendiculares à superfície do módulo, aumentando, desta forma, o rendimento.

#### **2.1.1 Tipos de seguidores solares quanto aos eixos**

A orientação do sistema pode ser feita de várias maneiras dependendo do número de eixos de rotação (Oliveira, 2008):

- Um eixo
  - Eixo horizontal
  - Eixo vertical
  - Eixo polar
- Dois eixos
  - Eixo horizontal e eixo vertical

Existem dois tipos de seguimento solar quanto aos eixos. Pode haver um ou dois eixos de movimentação. Quando existe apenas um eixo de movimentação, este pode ter uma orientação horizontal, vertical ou polar. Havendo dois eixos, um deles, vertical, ajusta o azimute da superfície, o outro, horizontal, ajusta a inclinação dos painéis (Oliveira, 2008).

As montagens que utilizam o movimento sobre o eixo horizontal, orientação Este-Oeste, são de montagem robusta e de baixa manutenção. No entanto, tais montagens não apresentam um ganho importante em estações com dias curtos. O seu funcionamento baseia-se em seguir a trajectória aparente do sol em cada dia, começando na sua posição de nascimento. No momento em que o sol se encontra no seu ponto de maior altitude, o painel encontra-se com o ângulo mínimo de inclinação, voltando à sua posição inicial ao entardecer. Este tipo de seguimento é utilizado, nomeadamente, na Central Solar de Serpa, em Portugal.

Uma montagem com o eixo horizontal pode também ter uma orientação distinta da que se acabou de descrever: pode, na verdade, haver uma montagem com o eixo horizontal mas com orientação Norte-sul. À semelhança do sistema anterior, também este é robusto e de baixa manutenção.

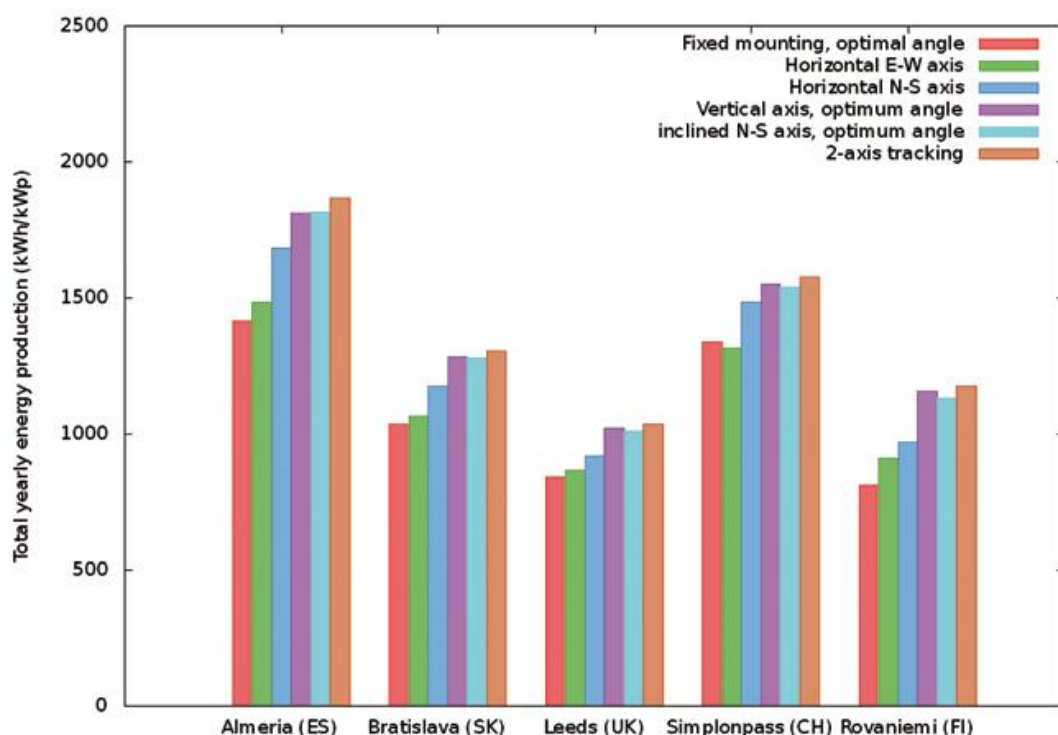
O seguidor com eixo vertical móvel faz o seguimento no sentido Este-Oeste e usufrui também de um bom desempenho. O ajuste da inclinação do conjunto de painéis pode ser feito manualmente, conforme a estação do ano.

Finalmente, dentro dos seguidores com um eixo, tem-se o seguidor polar que tem a particularidade de ter o eixo de rotação paralelo ao eixo da Terra, ou seja, o eixo de rotação é inclinado e tem a direcção Norte-Sul.

Mais complexo é o seguimento em dois eixos, contando com movimentação azimutal (eixo vertical) e de inclinação (eixo horizontal), proporcionando, assim, um grande rendimento de conversão da componente directa da radiação solar. Este tipo de seguimento é também o mais preciso.

Para uma comparação de desempenhos, atente-se na Figura 2.1 (Thomas Huld, n.d.). No documento referido, os autores fazem a comparação do desempenho de várias estruturas, em várias cidades europeias. As estruturas em questão são as seguintes:

- Estrutura estática com uma inclinação óptima
- Estrutura com o eixo horizontal, orientação E-W
- Estrutura com o eixo horizontal, orientação N-S
- Estrutura com o eixo vertical, com uma inclinação óptima
- Estrutura polar
- Estrutura com dois eixos de seguimento



**Figura 2.1: Comparação de tipos de seguimento na Europa (Thomas Huld, n.d.)**

Observando o gráfico, chega-se à conclusão que a estrutura de eixo horizontal com orientação E-W tem uma ligeira vantagem sobre o sistema fixo, excepto em zonas fortemente sombreadas (Simplonpass) mas raramente chega a 10%. Uma estrutura de eixo horizontal com orientação N-S tem melhor desempenho em todos os casos estudados, resultando num ganho de energia de 10-20% face ao sistema fixo. Uma melhoria substancial é observada quando se opta por uma estrutura polar ou de eixo de rotação vertical com o painel com a inclinação óptima. Finalmente, a estrutura com dois eixos de rotação tem um desempenho idêntico à estrutura polar, embora sempre ligeiramente superior.

Como mostrado por Huang (Huang & Sun, 1996), comparado com um painel fixo com uma inclinação igual à latitude local, um sistema de seguimento em dois eixos pode aumentar a geração de energia em cerca de 41% enquanto que um sistema de seguimento em apenas um eixo pode ter melhorias na ordem dos 36%.

Uma vez que a opção de utilizar dois eixos em vez de um implica uma maior complexidade e, conforme demonstrado, as melhorias no desempenho não são assim tão significativas, para uma aplicação de painéis fotovoltaicos simples, seria aconselhável optar por uma estrutura de seguimento de um eixo, sendo que este seria inclinado (eixo-polar).

A mesma opção não pode ser tomada se, ao invés de painéis fotovoltaicos, o seguidor em causa se destinar a aplicações de concentração fotovoltaica. Como já foi referido, esta tecnologia permite expor os módulos fotovoltaicos a energia solar concentrada, aumentando, desta forma, a quantidade de irradiação que atinge cada célula. No entanto, esta tecnologia tem ângulos de admitância muito

pequenos, sendo por isso, muito exigente a nível de precisão de seguimento (Quaschnig, 2005). Ou seja, para haver, de facto, uma melhoria no desempenho, a estrutura deve estar perfeitamente alinhada com o sol. Por esta razão é crucial que o seguimento seja feito em dois eixos que, conforme já referido, é a escolha que oferece maior precisão.

### **2.1.2 Tipos de seguidores solares quanto à tecnologia**

O seguimento solar, de uma forma geral, pode ser feito de duas formas distintas, podendo assim ser dividido em dois grandes grupos:

- Seguimento astronómico
- Seguimento com sensores de luz

O seguimento astronómico pressupõe o conhecimento de coordenadas espaciais e temporais. Neste tipo de arquitectura, o seguimento solar é feito através de cálculos matemáticos onde são considerados parâmetros como o declive terrestre, latitude, ângulo horário, dia do ano, etc. (Oliveira, 2008).

Para ter conhecimento acerca da posição do sol a uma dada altura é necessário um relógio e a resolução de várias equações. Para pôr uma estrutura de seguimento a funcionar correctamente é necessário saber a sua localização geográfica e a sua orientação relativamente à superfície terrestre. Para tal é utilizado um sensor de gravidade, o qual, idealmente, há-de apontar para o centro da Terra e dizer com que desfasagem se encontra. Através de cálculos é possível obter a posição do sol relativamente à estrutura e assim poder accionar os motores para que haja um seguimento preciso.

O seguimento baseado em sensores de luz recebe informação do sensor que, por sua vez, recebe a informação acerca da posição do sol, relativamente ao sensor, a partir do próprio sol. Estes sistemas, normalmente, são mais simples e económicos do que os anteriormente referidos.

Para a estrutura de seguimento estar correctamente direccionada para o sol, existem vários erros associados. O facto de se utilizar o seguimento baseado em sensores de luz em detrimento do seguimento astronómico, só por si, reduz muitos desses erros.

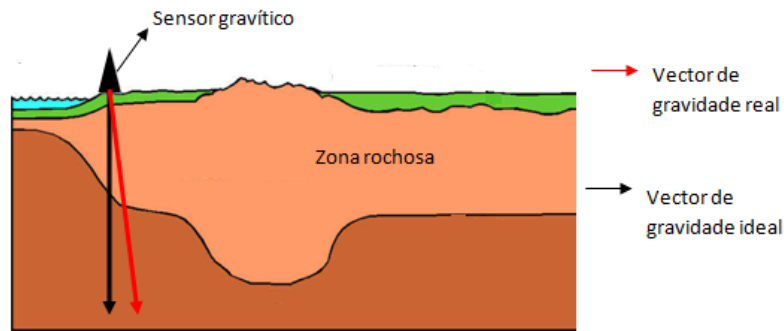
#### **2.1.2.1 Erros associados a cada um dos tipos de seguimento**

A cada um dos tipos de seguimento referidos, existem vários erros associados, como se poderá constatar de seguida.

##### **2.1.2.1.1 Seguimento Astronómico**

O seguimento astronómico, tecnologia actualmente utilizada pela WS-Energia S.A., como se vai ver em seguida, tem vários erros associados.

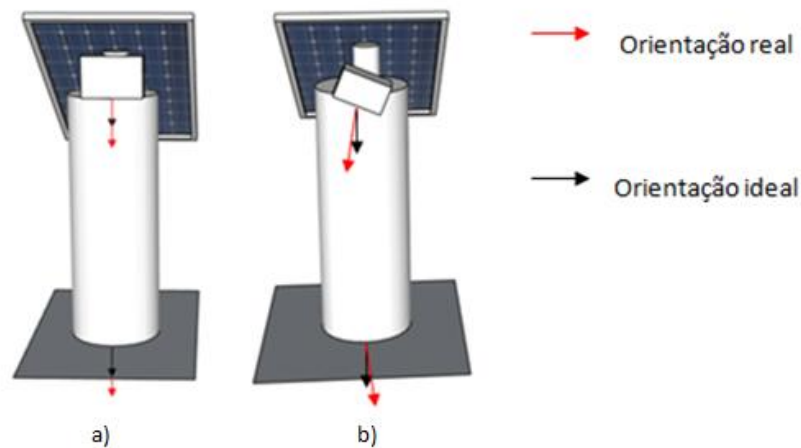
Em primeiro lugar, associado à utilização do sensor gravítico existe logo a possibilidade de este, na realidade, por erros do mesmo ou por erros associados à não-uniformidade do centro do planeta, não apontar precisamente para o centro da Terra. É sabido que o vector de gravidade aponta no sentido da maior massa. Em princípio, o vector de gravidade aponta sempre no sentido do centro da Terra mas, como ilustra o exemplo da Figura 2.2, existem situações em que o vector de gravidade pode ser um pouco desviado, devido à presença de grandes massas no interior da Terra.



**Figura 2.2: Esquema de uma fonte de erro da leitura da gravidade**

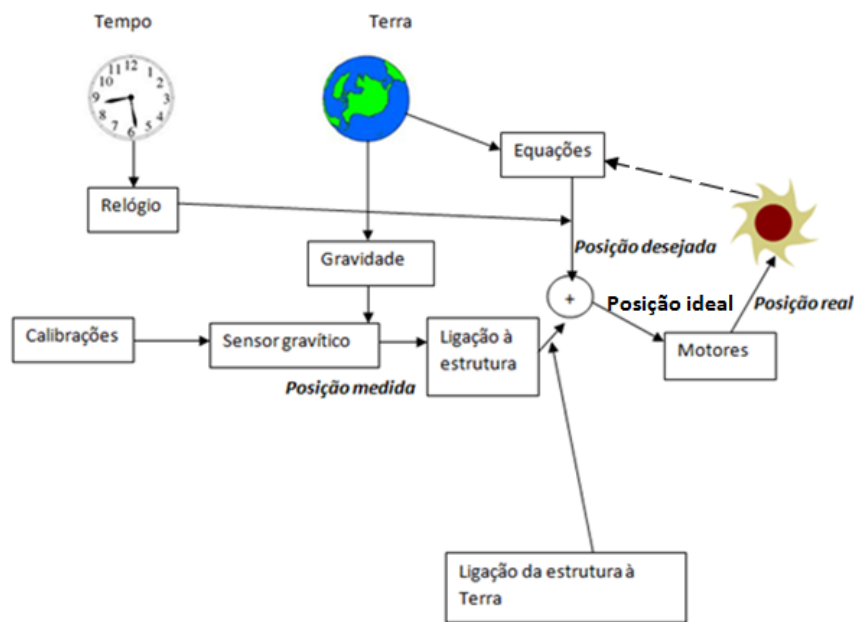
Associados à instalação do sistema existem também muitos erros como, por exemplo, a ligação do sensor gravítico à estrutura, ou a ligação da própria estrutura à Terra.

O sensor gravítico, que se encontra no interior da caixa de robótica da WS-Energia S.A., deve ter a mesma orientação que o seguidor, sendo que, qualquer desvio da mesma em relação ao seguidor estará a induzir erros no seguimento. Tal como o sensor gravítico referente à estrutura, também a estrutura referente à superfície terrestre deve estar perfeitamente alinhada, com riscos de induzir mais erros no seguimento, tal como se mostra na Figura 2.3.



**Figura 2.3: Esquema de possíveis erros na montagem**

Assim sendo, atente-se na cadeia de erros ilustrada na Figura 2.4:



**Figura 2.4: Cadeia de erros no seguimento astronómico**

A Figura 2.4 tem como objectivo ilustrar a cadeia de propagação do erro associada à utilização de seguimento astronómico. Como se pode observar pela figura, por um lado, o sistema tem informações referentes às coordenadas horárias, através do relógio. Por outro, o sistema tem também informações acerca das coordenadas geográficas, através da resolução de algumas equações que consideram o movimento da Terra em relação ao sol e a posição do seguidor na Terra, como a sua latitude e longitude. Juntando as informações das coordenadas horárias e geográficas obtém-se a posição desejada do seguidor.

Por sua vez, é necessária também a informação vinda do sensor de gravidade, dando a posição da estrutura. Esta posição da estrutura tem de ser levada em conta, bem como a posição desejada, para se poder encontrar a posição ideal do seguidor em relação ao sol. Tendo a posição ideal resta apenas actuar os motores no sentido desejado para ter o seguidor orientado para o sol.

Como já foi referido, neste percurso existem muitas fontes de erro. Observando a Figura 2.4, existem fontes de erro em todas as fases de seguimento. Primeiramente, existem erros, se bem que mínimos, para encontrar a posição desejada, já que bastam uns segundos de desfasagem no relógio para haver erro na posição desejada. A posição medida, tal como já foi referido, tem vários erros associados, tais como erros no sensor de gravidade ou provenientes da não-uniformidade da Terra. Idealmente, esta seria a posição do seguidor mas, na realidade não é. Na realidade esta é a posição do sensor de gravidade, e com erros. Para se obter a posição do seguidor, tem de se ter em conta a posição do sensor relativamente à estrutura e a posição da estrutura relativamente à superfície terrestre. A posição ideal é uma composição entre a posição desejada e a posição medida. Mesmo admitindo que não existem erros nestes cálculos, há uma propagação dos erros anteriores, o que faz com que a posição



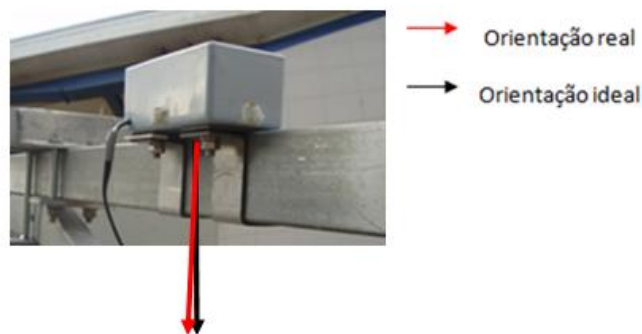
ideal teórica, que faria com que o seguidor estivesse perfeitamente orientado para o sol, dificilmente seja igual à posição ideal obtida por este meio. Para finalizar o procedimento de orientar a estrutura para o sol basta apenas actuar os motores de acordo com a posição ideal obtida. Ora, também esta acção tem erros associados.

Concluindo acerca da utilização de seguimento astronómico, fica demonstrado que esta aproximação tem vários erros associados difíceis de ultrapassar, o que se reflectirá na precisão de seguimento do sol.

#### **2.1.2.1.2 Seguimento com sensores de luz**

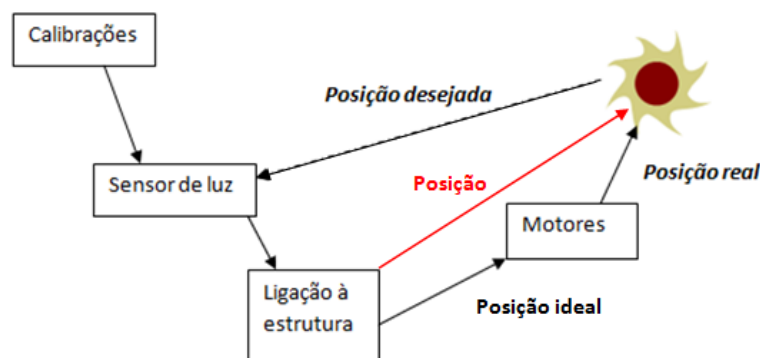
O seguimento baseado em sensores de luz tem também erros associados, embora com muito menor dimensão do que ocorre com o seguimento astronómico.

As fontes de erro associadas à utilização do sensor de luz resumem-se, principalmente, à ligação do próprio sensor à estrutura de seguimento. Esta fonte de erro, no entanto, pode ser minimizada se a forma geométrica do sensor tiver a superfície de contacto lisa, o que, de facto, se verificará, como se pode observar pela Figura 2.5.



**Figura 2.5: Exemplo de possível erro de desfasagem entre o sensor e a estrutura**

Outro possível erro associado à utilização de sensores de luz é o facto destes poderem estar mal calibrados, ou seja, estarem igualmente iluminados mas acusarem diferentes valores de luminosidade. Tal erro tem consequências directas na orientação do sensor. Para uma melhor compreensão atente-se na Figura 2.6, onde é ilustrada a cadeia de erros referente ao seguimento baseado em sensores de luz.



**Figura 2.6: Cadeia de erros no seguimento com sensores de luz**

A Figura 2.6 tem como objectivo ilustrar a cadeia de propagação do erro quando se opta pelo seguimento através de um sensor de luz. Como se pode observar, a posição do sol é directamente apreendida pelo sensor de luz, relativamente ao próprio. Como fonte de erro, existe a possibilidade de este estar desalinhado com a estrutura mas, como já foi referido, existem técnicas para reduzir este erro. Tal como foi feito na ilustração da cadeia de erros do seguimento astronómico (Figura 2.4), também na Figura 2.6 estão representadas as posições ideal e real, sendo distintas apenas por um possível erro nos motores. No entanto, neste tipo de seguimento, uma vez que a posição do sol, relativamente ao sensor, é directamente apreendida pelo mesmo, esta distinção não faz sentido, bastando por isso representar a posição do seguidor (a vermelho). Por outras palavras, a referência do sensor de luz provém, directamente, da posição deste em relação ao sol e, como já foi dito, a diferença entre a posição da estrutura e a posição do sensor difere, única e exclusivamente, de um possível erro de desfasagem.

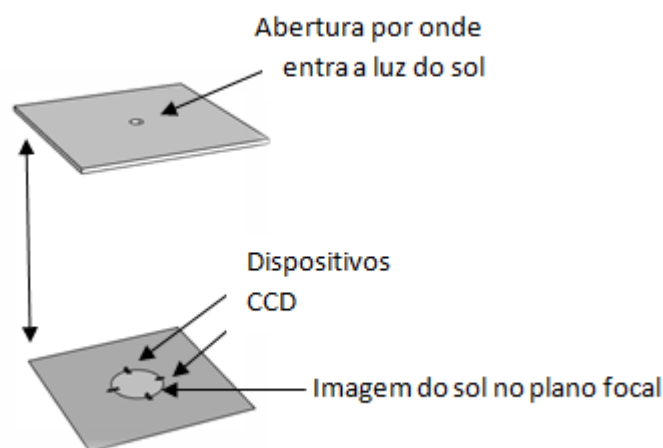
Como foi possível averiguar pela descrição das fontes de erro de ambos os tipos de seguimento, ao passo que o seguimento astronómico tem várias fontes de erro difíceis de ultrapassar, tornando uma boa precisão, no seguimento, difícil de alcançar, as fontes de erro no seguimento através de sensor de luz resumem-se, basicamente, à calibração do sensor, a uma possível desfasagem entre a orientação do sensor e da estrutura e à precisão da placa de aquisição de dados.

## 2.2 Sensores de luz para seguimento solar

Vários documentos já foram escritos descrevendo trabalhos feitos na área do seguimento solar seja este feito para dispositivos de conversão fotovoltaica, concentradores de energia, transformação térmica ou para dispositivos de medição. Seja qual for o tipo de aplicação, o seguimento solar pode ser feito da mesma forma.

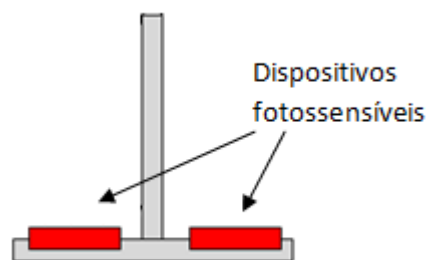
Este capítulo é reservado à apresentação de documentos que descrevem formas de seguimento solar e, mais especificamente, os tipos de sensores utilizados, a forma de utilização e, ainda, o respectivo desempenho. Pretende-se, assim fazer uma análise comparativa dos diversos tipos de sensores solares no que diz respeito ao desempenho, com o fim de eleger as tecnologias mais adequadas ao que se pretende.

Em 1988, Greene apresenta um sistema que faz o seguimento solar segundo dois eixos (Greene & Tan, 1988). O hardware do sistema consiste numa superfície opaca separada de 32 metros de uma superfície com detectores, sendo estes compostos por dois pares de sensores “charge-coupled device” (CCD), sendo cada um deles composto por 256 fotodíodos. Quando o sol está alinhado, a sua imagem no plano de imagem é uma circunferência mas quando se move um pouco, a sua imagem passa a ser uma elipse. Com os dispositivos CCD, consegue-se quantificar o movimento da imagem nos dois eixos e consegue-se facilmente saber o deslocamento necessário, nas duas direcções, para alinhar de novo o sensor com o sol.



**Figura 2.7: Esquema do sistema (Greene & Tan, 1988)**

Em 1996, Huang e Sun apresentam um sistema que consiste em fazer seguimento solar segundo apenas um eixo (Huang & Sun, 1996). Para tal, os autores utilizam, como sensor solar, um par de dispositivos fotossensíveis, sendo que nesta arquitectura, existe um dispositivo sombreador entre eles, como se pode observar pela Figura 2.8. O objectivo dessa parede é de fazer sombra num dos dispositivos quando este não está rigorosamente alinhado com o sol, o que faz com que o sistema perceba facilmente que um dos dispositivos está a ser mais iluminado que outro, concluindo, consequentemente, pela necessidade de ajustar a orientação do sistema.

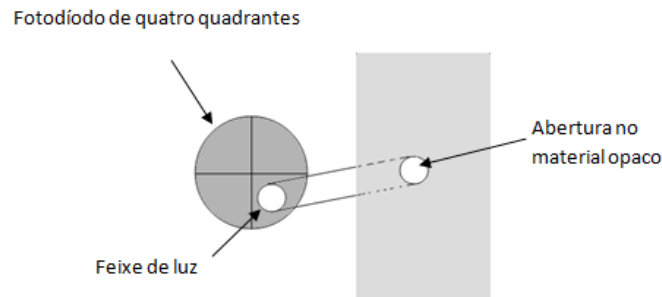


**Figura 2.8: Esquema do sensor utilizado por Huang em 1996**

Kalougirou, em 1996, (Kalougirou, 1996) descreve um sistema de seguimento solar de um eixo utilizando três fotoreistências. Nesta arquitectura, cada uma das três fotoreistências tem uma função distinta, sendo o objectivo da primeira detectar a boa ou má orientação do sistema ao sol, a segunda deve detectar a presença de nuvens, cabendo à terceira detectar se é dia ou noite. A fotoreistência responsável pelo seguimento solar está colocada na zona Este do colector, ou seja, é um sensor que apenas recebe luz solar directa quando o colector está bem orientado. Quando este deixa de estar bem orientado, é ele próprio a fazer sombra ao sensor, o que faz com que o sistema tenha de se mover no sentido de ficar novamente orientado para o sol, de maneira a que o sensor fique novamente iluminado pela irradiação directa do sol. Este sistema tem a particularidade de, ao detectar nuvens no céu que perturbem a detecção da orientação do sol, funcionar em anel aberto. Ou seja, quando o sensor não consegue detectar bem a posição do sol, o sistema passa a funcionar em anel aberto, fazendo rodar o sistema a uma velocidade idêntica à velocidade aparente do sol. Este sistema mostrou ser bastante fiável num período de teste de cerca de quatro anos. Contudo tem uma desvantagem, associada ao facto de utilizar sensores, pois a sua precisão depende da intensidade de iluminação do sol.

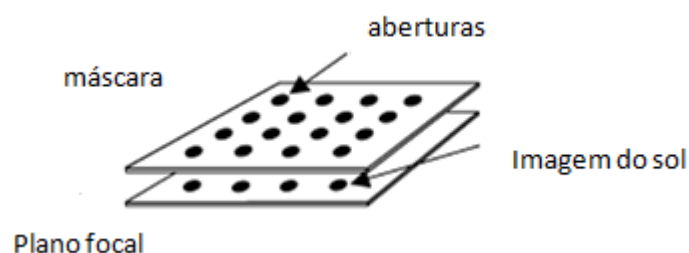
O sistema que se segue, apresentado por Roth (Roth, Georgiev, & Boudinov, 2004), tem a particularidade interessante de operar em dois modos. Quando o céu está relativamente limpo, ou seja, quando a posição do sol é perceptível pelo sensor, o sistema trabalha em anel fechado com base em informações recebidas pelos sensores. Por outro lado, quando o céu está encoberto, o sistema trabalha em anel aberto com base em equações matemáticas que definem a orientação do sol nesse instante. Neste sistema, o sensor utilizado é um fotodíodo de quatro quadrantes no interior de um tubo. Este é um dispositivo fotossensível que é dividido em quatro partes iguais. Um feixe de luz, ao incidir no dispositivo, vai iluminar uma parte das quatro divisões. Se o sistema estiver bem orientado, as quatro divisões vão estar igualmente iluminadas, ou seja, o feixe de luz vai estar no meio do dispositivo. O objectivo é ter sempre o feixe de luz no centro e, caso não esteja, a orientação do sistema deve ser ajustada. O sistema descrito faz o seguimento solar em dois eixos, vertical e horizontal, o que faz com que seja relativamente fácil de ajustar a posição do sistema, pois, tendo o fotodíodo quatro divisões iguais, se uma das divisões está mais iluminada do que outra, o sistema deve alinhar-se no sentido de

as iluminar igualmente. Quando as quatro divisões estiverem igualmente iluminadas, o sol está centrado no sensor, ou seja, o sistema está bem orientado. Para uma melhor percepção atente-se na Figura 2.9. Este sistema conta também com a presença de um sensor “noite-dia”, sendo neste caso um fototransístor. Este sistema de seguimento solar é um sistema relativamente económico que assegura muito tempo de vida, não exigindo muita manutenção.



**Figura 2.9: Sensor de quatro quadrantes (Roth, Georgiev, & Boudinov, 2004)**

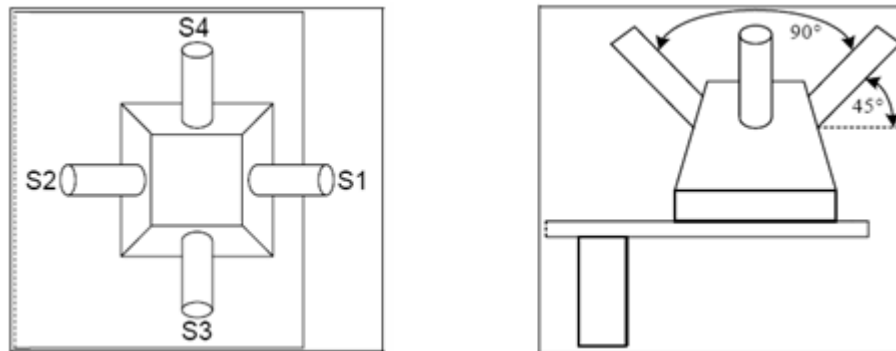
O sistema apresentado por Liebe, em 2004, à semelhança de outros sistemas de seguimento solar, utiliza uma superfície opaca como dispositivo de sombreamento, mas com 217 buracos em vez de um (Liebe, 2004). O plano focal é um sensor de pixéis activos (APS), por exemplo, um CCD. O dispositivo aqui descrito, conhecido por Solar Compass Chip (SCC) tem de ser ligado a um processador que vai ler a imagem e determinar a posição das aberturas através de processamento de imagem, com o objectivo de determinar a posição da imagem das aberturas e assim poder determinar a posição do sol. O objectivo desta tecnologia é ficar durante um tempo ao sol e, através de um pequeno movimento do sol, adivinhar com uma boa precisão qual vai ser a trajectória do sol.



**Figura 2.10: Esquema do sensor utilizado (Liebe, 2004)**

Assim como o sistema de Roth, em 2004, também o sistema proposto por Bingol, em 2005, faz o seguimento solar segundo dois eixos (Bingol, Altinta, & Oner, 2006). Para tal, o sistema utiliza quatro fotoresistências que trabalham aos pares. Duas controlam o movimento de azimute e as outras duas controlam a elevação. Como se pode observar pela Figura 2.11, o sensor em questão consiste numa

estrutura que contém as quatro fotoresistências, sendo que cada uma se encontra dentro de um tubo cilíndrico, estando estes separados, dois a dois, em 90°. Este sensor deverá estar fixo ao painel.



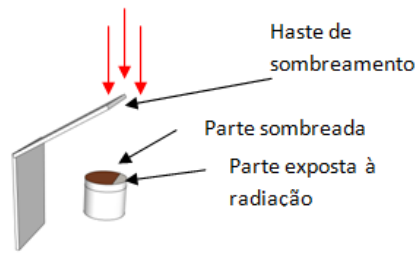
**Figura 2.11:** Esquema do sensor utilizado (Bingol, Altinta, & Oner, 2006)



**Figura 2.12:** Fotografia dos sistemas de seguimento solar e estacionário (Bingol, Altinta, & Oner, 2006)

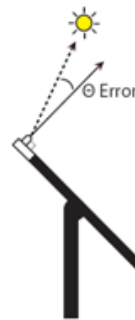
O princípio de funcionamento resume-se à comparação da luminosidade dos sensores. Estes devem ser comparados dois a dois. Atente-se, de momento, apenas no movimento de azimute. Se S1 estiver mais iluminado que S2, o sistema deverá rodar no sentido de igualar a luminosidade nos dois sensores. O mesmo acontece para o movimento de elevação. Compara-se o valor dos outros dois sensores e actua-se no motor com o eixo horizontal. O sistema em causa foi comparado com um sistema equivalente mas sem seguimento solar, tendo-se concluído que o painel acoplado ao sistema de seguimento solar tem mais densidade de luz do que o painel acoplado ao sistema estacionário.

Finalmente, Oliveira, em 2008, na sua dissertação, faz a descrição de um sistema de seguimento solar segundo um eixo (Oliveira, 2008). Para tal utiliza apenas um sensor composto por um fototransistor acoplado à estrutura no lado oeste do painel. Este sensor é composto por um fototransistor e por uma haste de sombreamento. Quando o painel está bem orientado para o sol, a haste de sombreamento faz sombra ao sensor. Quando a luminosidade passa um certo nível, quer dizer que a luz solar já está a incidir sobre o sensor, o que faz com que o sistema tenha de rodar um pouco mais até a haste de sombreamento voltar a sombrear o sensor.



**Figura 2.13: Esquema do sistema (Oliveira, 2008)**

Em seguida apresenta-se um sensor actualmente disponível no Mercado (Davis, 2009). É um instrumento que é utilizado para medir o desempenho de um sistema de seguimento solar, que consiste num sensor de alta resolução que deve ser montado no sistema de seguimento solar com o fim de medir o ângulo de erro entre o sol e o seguidor. Este tipo de sistema oferece muita precisão e é mais caro do que os referidos anteriormente. Consiste em ter um dispositivo que tira fotografias sucessivas e, através de processamento de imagem, consegue encontrar o centro do sol. Este sistema é utilizado apenas para analisar o desempenho do seguidor solar e não para ser, ele próprio o sensor para o seguimento solar.



**Figura 2.14: Fotografia e esquema do sensor [www.greenmountainengineering.com]**

Em Julho de 2010, Arturo M. e Garcia P. (Minor & García, 2010) apresentam um sistema de seguimento solar baseado numa webcam, através de técnicas de processamento de imagem. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de seguimento solar, cuja precisão obtida foi de  $0,1^\circ$ . Este sistema é interessante tendo, no entanto, a desvantagem de ser necessário um computador para que seja feito o seguimento solar.

Após uma análise atenta destes sistemas de seguimento solar, é possível fazer uma divisão do tipo de sistemas em três grandes grupos:

- Sistemas com dispositivos fotossensíveis simples
- Sistemas com sensores de pixéis activos (APS) ou com dispositivo de quatro quadrantes
- Sistemas “Machine Vision”

### 2.2.1 Sistemas com dispositivos fotossensíveis simples

Enquadram-se neste grupo os sistemas que utilizam sensores constituídos por dispositivos fotossensíveis simples, sejam eles fotoresistências, fotodíodos ou fototransístores. Estes sistemas podem ser constituídos por um ou mais destes dispositivos. Geralmente, quando é utilizado apenas um dispositivo, o objectivo é fazer o seguimento solar através de apenas um eixo, sendo utilizada uma sombra para o sistema saber se deve rodar ou manter-se instável (Kalougirou, 1996), (Oliveira, 2008). Podem, por outro lado, ser utilizados dois dispositivos fotossensíveis simples para seguimento num eixo. De acordo com a disposição destes dois dispositivos fotossensíveis, pode-se ainda dividir em dois sub-grupos segundo o modo como forem posicionados (Mousazadeh, Keyhani, Javadi, Mobli, K, & Sharifi, 2009):

- Sensores directamente direccionados para o sol
- Sensores com um desfasamento angular entre si

#### 2.2.1.1 Sensores directamente direccionados para o sol

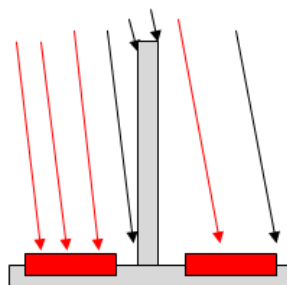


Figura 2.15: Esquema de disposição de sensores

São utilizados dois dispositivos fotossensíveis simples directamente direccionados para o sol, mas com um dispositivo entre eles de maneira a fazer sombra a um ou a outro quando está mal orientado e assim ser fácil de detectar que se deve rodar e para que lado (Huang & Sun, 1996). Na Figura 2.15 está representado este conceito da disposição dos sensores. Pode-se observar a vermelho os raios de sol que são detectados pelos respectivos dispositivos. Como se pode observar, o dispositivo de sombrear tem um papel muito importante na diferenciação dos dois dispositivos.



### 2.2.1.2 Sensores com um desfasamento angular entre si

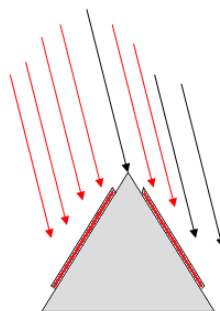


Figura 2.16: Esquema de disposição de sensores

Neste subgrupo são utilizados dois dispositivos fotossensíveis simples que são separados de um certo ângulo. Quando o seguimento é feito em dois eixos, é usual utilizar-se uma arquitectura idêntica mas desta vez, em vez de dois sensores, utilizam-se quatro que devem trabalhar dois a dois. Dois sensores para cada eixo (Bingol, Altinta, & Oner, 2006). Na Figura 2.16 está representado este conceito da disposição dos sensores. Pode-se observar a vermelho os raios de sol que são detectados pelos respectivos dispositivos. Como se pode observar, o facto de os dois dispositivos terem um desfasamento entre si tem um papel muito importante na diferenciação dos mesmos.

### 2.2.2 Sistemas com sensores de pixéis activos (APS) ou com dispositivo de quatro quadrantes

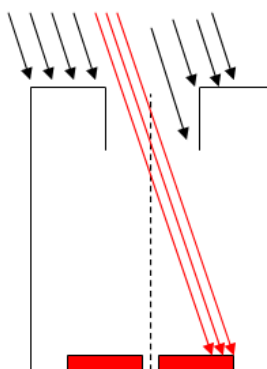


Figura 2.17: Esquema de disposição de sensores

Neste grupo de sensores é usual analisar-se a luminosidade do sol num plano, após passar por uma pequena abertura num plano superior (Figura 2.17). Neste grupo enquadram-se os sensores compostos por dispositivos de quatro quadrantes, por exemplo, o fotodíodo de quatro quadrantes (Roth, Georgiev, & Boudinov, 2004) ou conjunto de quatro fotodíodos (Choi, Kim, Park, & Chung, 2008), (Greene &

Tan, 1988). Considera-se também neste grupo dispositivos APS, por exemplo um CCD para detectar a imagem do sol no plano de imagem através de um ou mais buracos (Liebe, 2004) (Figura 2.10). Na Figura 2.17 está representado este conceito da disposição dos sensores. O dispositivo de sombreamento corresponde a um tubo opaco que previne a radiação difusa, tornando assim mais precisa a medida do alinhamento do sol (Mousazadeh, Keyhani, Javadi, Mobli, K, & Sharifi, 2009). Pode-se observar a vermelho os raios de sol que são detectados pelos respectivos dispositivos. Esta é uma forma de facilitar a diferenciação de luminosidade entre os dispositivos, podendo também ser aplicado este conceito ao seguimento de dois eixos, aproximando-se assim à arquitectura proposta por (Choi, Kim, Park, & Chung, 2008), onde são utilizados quatro fotodíodos ou (Roth, Georgiev, & Boudinov, 2004) onde os quatro dispositivos correspondem a um fotodíodo de quatro quadrantes.

### 2.2.3 Sistemas “Machine Vision”

Neste grupo de sensores enquadram-se sensores como o mecanismo atrás descrito (Davis, 2009). No artigo referido, o autor descreve sucintamente o funcionamento do sistema de avaliação do desempenho de seguidores solares. Ao enquadrar esta tecnologia neste capítulo, a ideia é utilizar um dispositivo semelhante para ser um sensor de seguimento solar extremamente preciso (Minor & García, 2010), mesmo que, para isso, seja necessário utilizar um sensor económico com menos precisão para garantir que o sol se encontra sempre no campo de visão deste sensor. Consiste em ter um dispositivo que tira fotografias sucessivas e, através de processamento de imagem, consegue encontrar o centro do sol. Pode-se utilizar uma câmara CCD ou CMOS. Estes dispositivos têm a vantagem de ter alta resolução e precisão. Em geral, os algoritmos de processamento de imagem têm relativa facilidade em encontrar objectos de características conhecidas e, se forem algoritmos robustos, podem tornar o sistema insensível a distorções da imagem do sol, tais como nuvens ou reflexos. A utilização de uma larga matriz de pixéis permite fazer um círculo à volta do sol e, a partir deste, calcular o centro do mesmo, mesmo que este esteja parcialmente coberto com nuvens (Davis, 2009). A título ilustrativo, mostra-se o resultado de um programa feito em Matlab®, na Figura 2.18, que recebe uma fotografia do céu e calcula o centro do sol assinalando-o.

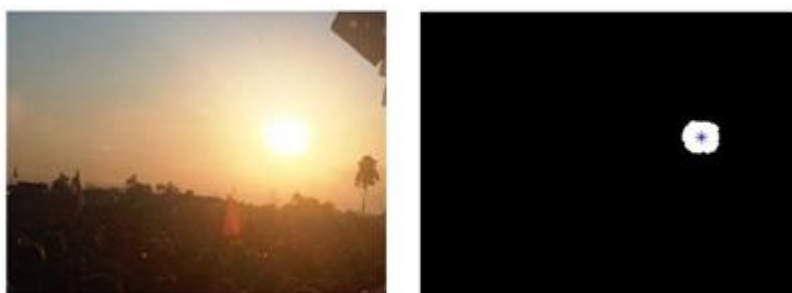


Figura 2.18: Procura do centro do sol através de um programa Matlab®

Na primeira imagem apresenta-se a fotografia original. Na segunda imagem apresenta-se a mesma imagem a preto e branco com um “threshold” muito elevado, ou seja, só ficam a branco os pixéis mesmo muito claros. Ainda nesta imagem está representado também o centro do sol. Este será o ponto importante num sistema de seguimento solar.

## 2.3 Robótica Sun Gravity Control ®

A robótica Sun Gravity Control® da WS-Energia consiste num equipamento feito à medida das necessidades da empresa. Este equipamento dispõe de tudo o que é necessário ao seu funcionamento, tais como o sensor de gravidade, supercondensadores para suprimir pequenos cortes de energia, comunicação GSM e muitos mais dispositivos indispensáveis a um correcto funcionamento.

Para programar a robótica do sistema, é utilizado o programador ICD3 da Microchip®, que se pode ligar directamente à placa.

Este equipamento tem também uma porta I2C disponível, que pode ser utilizada para a leitura de vários sensores, nomeadamente sensores de vento ou de radiação. Para a comunicação entre o sensor a desenvolver e a robótica do sistema deverá ser utilizada a porta I2C em questão.

Muito utilizada para testes, existe também uma porta RS-232 para se poder ligar a um computador e, assim, através do programa Termite®, poder ter um *output* do programa em funcionamento.

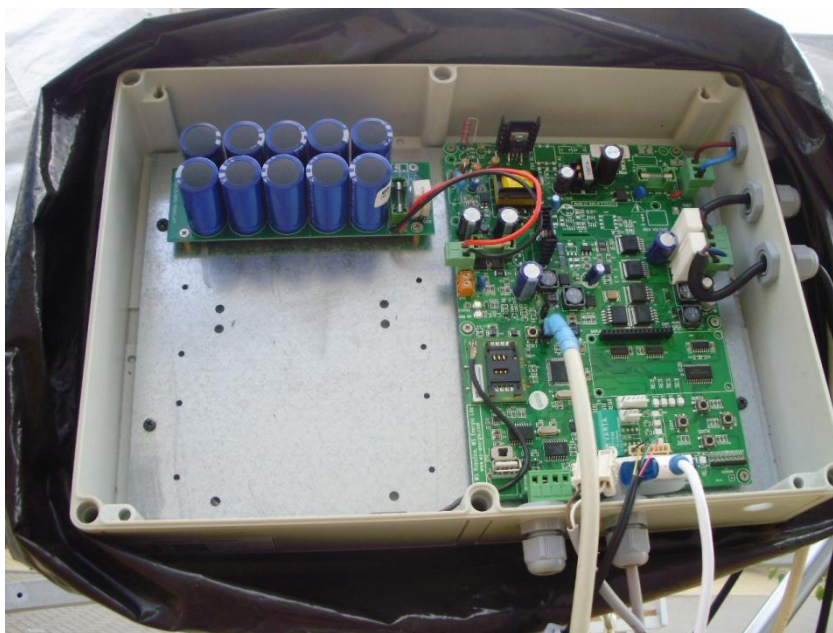


Figura 2.19: Robótica Sun Gravity Control®

## 2.4 Protocolo de comunicação I2C

Este protocolo utiliza apenas dois fios para comunicação, sendo eles chamados de *SCL* e de *SDA*, e mais dois fios para alimentação, normalmente 5V ou 3,3V e *GND*. *SCL* é a linha de clock, sendo utilizado para o sincronismo da transferência de dados no barramento I2C, constituindo *SDA* a linha de dados. Estas linhas são ligadas a todos os dispositivos do barramento, como se pode observar pela Figura 2.20.

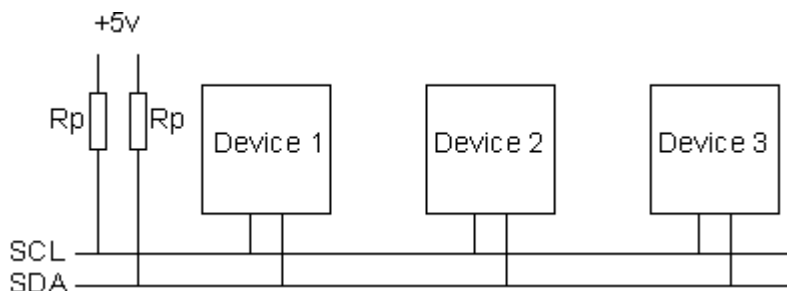
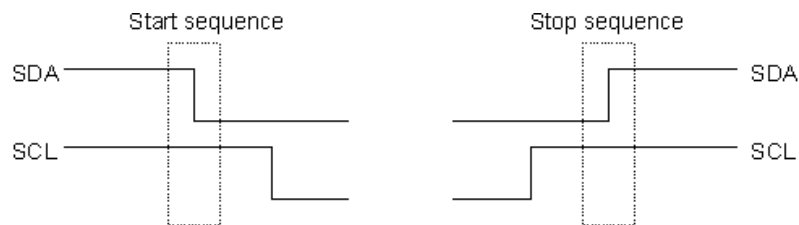


Figura 2.20: Esquema exemplificativo da comunicação I2C

Ao observar a Figura 2.20, note-se a presença de duas resistências  $R_p$  ligadas a 5V. Estas resistências são chamadas de resistências pull-up e são imprescindíveis, pois as linhas *SCL* e *SDA* são “open drain” (colector aberto), querendo isto dizer que apenas são capazes de puxar as linhas para baixo (nível lógico 0), necessitando, assim, de uma resistência pull-up para conseguirem puxar para cima (nível lógico 1). No entanto, o valor destas resistências não é crítico, funcionando com resistências de 1,8K $\Omega$  mas também com resistências de 47k $\Omega$ . Caso as resistências não estejam presentes, as linhas *SCL* e *SDA* vão estar sempre a zero e a comunicação I2C não funcionará.

Numa comunicação I2C existe sempre um *Master* e um *Slave*. O *Master* é o dispositivo que tem o controlo da linha de *clock* e o *Slave* apenas responde ao *Master* não podendo iniciar uma comunicação. Normalmente existe apenas um *Master* e vários *Slaves*, podendo, no entanto, existir mais do que um *Master* na mesma comunicação.

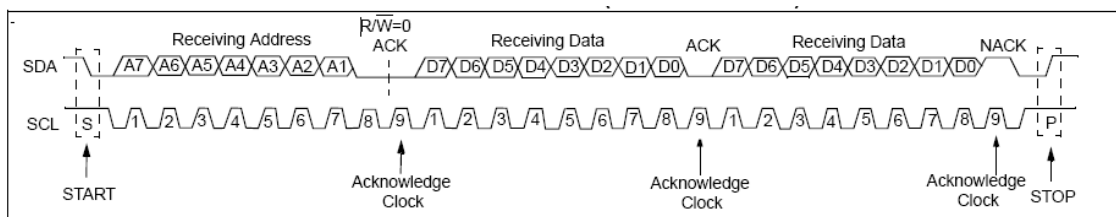
Quando o *Master* quer iniciar uma comunicação, começa por enviar uma sequência de *Start* no barramento I2C, podendo esta comunicação ser interrompida com uma sequência *Stop*. Estas duas sequências são especiais, pois são as duas únicas sequências onde a linha *SDA* é permitida mudar enquanto a linha *SCL* está no nível lógico “1”. Aquando da transferência de dados, não é permitido mudar *SDA* enquanto a linha de *clock* está a “1”.



**Figura 2.21: Sequências Start e Stop**

Os dados são transferidos em sequências de 8 bits. Estes bits são colocados na linha de dados começando no bit mais significativo (MSB). Em seguida, a linha de *clock* dá um impulso para cima e para baixo. Por cada 8 bits transferidos, o dispositivo receptor envia um bit de reconhecimento (*ACK*), o que faz com que sejam precisos 9 ciclos de *clock* para uma transferência de 8 bit. Se o dispositivo receptor enviar um *ACK* bit a “0”, quer dizer que recebeu e está pronto para receber mais um byte. Por outro lado, se enviar a “1”, isso quer dizer que não pode receber mais, devendo por essa razão o *Master* terminar a comunicação enviando uma sequência stop.

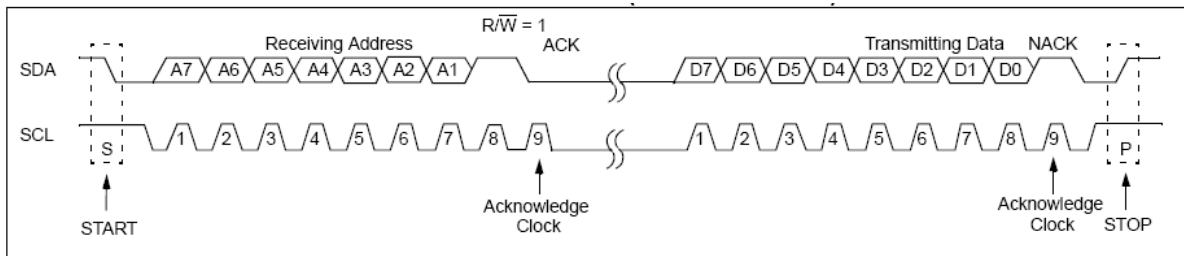
A primeira coisa a acontecer é o dispositivo *Master* enviar uma sequência *Start*. Esta acção vai fazer com que todos os *Slaves* do barramento fiquem atentos ao que se segue. O *Master*, depois de enviar a sequência *Start*, vai enviar o endereço do dispositivo com quem pretende comunicar. O dispositivo destinatário continua a transacção enquanto que os outros vão ignorar tudo o que se passa no barramento até haver mais uma sequência *Start*. O passo seguinte é definir a acção pretendida pelo *Master*, ou seja, se pretende escrever no *Slave* ou, então, ler a partir dele. O *Master* pode agora enviar os dados que pretende para o *Slave*, tendo de terminar com uma sequência *Stop*.



**Figura 2.22: Exemplo de escrita no pic18f4420 [datasheet]**

Como se pode observar pela Figura 2.22, que representa a acção do pic18f4420 como *Slave*, a sequência de escrita, tal como a de leitura, começa com uma sequência *Start* enviada pelo *Master*. Os próximos 8 bits são compostos por 7 bits que contêm o endereço do *Slave* destinatário e um bit reservado para determinar a acção a efectuar, podendo esta ser de escrita ou de leitura. Na Figura 2.22, o oitavo bit é zero, pois a acção pretendida é de escrita. Recebido tanto o endereço como a acção pretendida, o *Slave* envia um bit de reconhecimento (*ACK* bit) dizendo que recebeu tudo bem. O *Master*, recebendo tal bit, inicia a transmissão enviando 8 bits de dados. O *Slave*, recebendo-os, pode

enviar um *ACK* bit caso queira receber mais uma sequência de dados, ou, por outro lado, um *NACK*, dizendo desta forma ao *Master* que não pretende receber mais dados. O *Master*, caso receba um *ACK*, envia mais uma sequência de dados mas, se recebe um *NACK*, envia uma sequência *STOP*, terminando desta forma a comunicação.



**Figura 2.23: Exemplo de leitura do pic18f4420 [datasheet]**

Tal como já foi anteriormente dito, a sequência de leitura começa com uma sequência *Start* enviada pelo *Master*. Em seguida, tal como no exemplo de escrita, o *Master* envia o endereço nos sete primeiros bits mas, desta vez, o oitavo bit vem a “1”, pois a acção pretendida é uma leitura. O *Slave*, recebendo esta sequência e verificando que o endereço pretendido coincide com o seu, envia um bit *ACK*. Por esta altura, é permitido ao *Slave* parar a linha de *clock*, de forma a ter tempo de organizar a informação pretendida e a preencher a buffer de saída com a informação pretendida. Com tudo organizado, o *Slave* solta a linha de *clock* e, nos oito *clocks* seguintes, são enviados os oito bits de dados. O *Master*, sendo o dispositivo receptor, envia um *ACK* se desejar receber mais uma sequência ou um *NACK* no caso contrário. Caso seja um *Nack*, o *Master* envia também um bit *STOP* terminando desta forma a comunicação.

### 3. Desenvolvimento dos sensores de luz

No presente capítulo é apresentado o sensor de precisão, sensor baseado em processamento de imagem, utilizando uma webcam. Neste capítulo pode também encontrar-se, para além de uma breve descrição de dispositivos sensíveis à luz tais como fotoresistências, fotodíodos e fototransístores, o resultado de vários testes, comparando os referidos dispositivos em várias situações, com o intuito de escolher o dispositivo mais indicado para o desenvolvimento de um sensor.

#### 3.1 Sensor de precisão

##### 3.1.1 Dispositivo utilizado

Para a elaboração de um sensor de precisão considerou-se um sensor baseado em “Machine Vision”, sendo utilizada uma webcam da marca Genius, modelo eFace 1300 mostrada na Figura 3.1 a). Na Figura 3.1 b) encontra-se o sensor de precisão já montado na estrutura de seguimento.

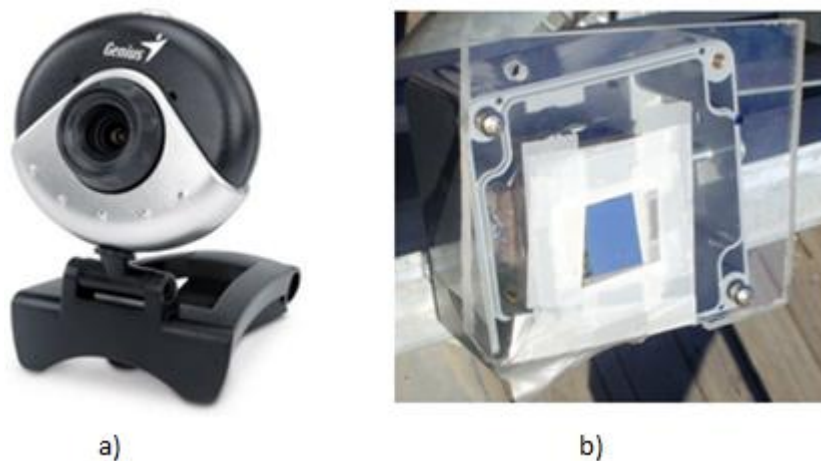


Figura 3.1: a) Webcam eFace1300. b) Sensor de precisão

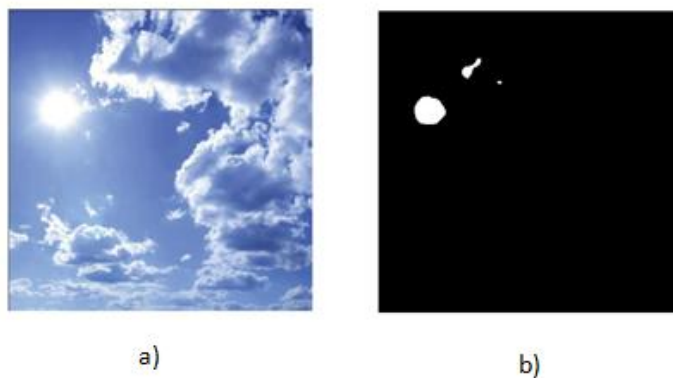
O objectivo deste sensor não é fazer o seguimento solar mas sim avaliar o desempenho de outros sensores. A Webcam estará acoplada à estrutura de seguimento (Figura 3.1 b) ), de modo a estar direccionada da mesma forma que a própria estrutura. O objectivo deste sensor é, após captar uma imagem do céu, encontrar o centro do sol através de técnicas de processamento de imagem. Idealmente o sensor estará perfeitamente alinhado com a estrutura de seguimento, o que significa que o ponto para onde esta está direccionada corresponderá ao centro da imagem. Desta forma, se o centro da imagem coincidir com o centro do sol, a estrutura estará perfeitamente alinhada. Caso contrário,

este sensor é capaz de disponibilizar ao utilizador o ângulo de erro tanto vertical como horizontal, podendo avaliar desta forma o desempenho de outros sensores e até ser utilizado para calibrações.

### 3.1.2 Modo de funcionamento

#### 3.1.2.1 Procedimento para encontrar o Sol

Para conseguir detectar o sol numa imagem são necessários vários procedimentos. O primeiro consiste em passar a imagem do formato original, por exemplo, RGB, para uma imagem binária, ou seja, com apenas duas cores: preto e branco. Para tal é necessário converter a imagem original numa imagem de intensidades de claridade, ou seja, numa imagem em escalas de cinza e definir um limite de claridade. Este limite de claridade é o valor que faz a distinção entre o preto e o branco, pois todos os níveis de luminosidade menores do que o limite ficarão a preto (valor 0) e os maiores ficarão a branco (valor 1). Como exemplo, atente-se na Figura 3.2.



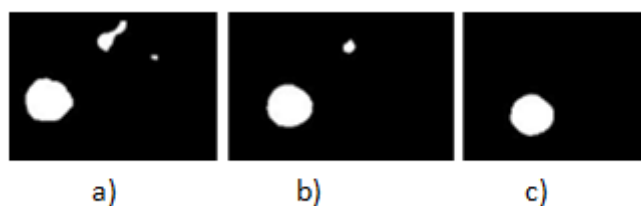
**Figura 3.2: Efeito da conversão para uma imagem binária**

Como se pode observar pela figura, após converter a imagem original (Figura 3.2 a) ) numa imagem binária ( Figura 3.2 b) ) com um limiar muito alto, na ordem dos 99%, os pixéis que permanecem a branco são muito poucos. No entanto, o sol não está ainda encontrado pois, de facto, está a branco mas também estão a branco reflexos das nuvens que são também muito claros. Num dia em que o sol não seja detectável, após esta conversão, a imagem obtida será uma imagem toda a negro, ou seja, o sol não é detectado.

Visto que a conversão da imagem original para a imagem binária não é suficiente para isolar o sol, deve-se proceder à aplicação de um filtro para eliminar os componentes brancos mais pequenos. Para tal utilizou-se um filtro de mediana. Esta acção devolve a imagem filtrada após ter passado a imagem original por um filtro de mediana com M linhas e N colunas. Cada pixel da imagem filtrada contém o valor da mediana numa vizinhança de M por N da imagem original. Este filtro é muito utilizado para suavizar imagens mas, numa imagem binária tem a particularidade de, ao suavizar a imagem, ir



diminuindo os componentes brancos, o que se mostra de grande utilidade na aplicação que se pretende (Figura 3.3).



**Figura 3.3: Efeito da aplicação do filtro de mediana**

A Figura 3.3 mostra a aplicação do filtro de mediana à imagem obtida pela conversão para imagem binária, por duas vezes. Como se pode observar, ao aplicar o filtro a primeira vez ( Figura 3.3 b) ), um dos componentes desapareceu e outro ficou mais reduzido. O maior, correspondente ao sol, como se pode observar, ficou mais suavizado, mais arredondado. Ao aplicar o filtro uma segunda vez ( Figura 3.3 c) ), obtém-se apenas o componente correspondente ao sol.

Ao observar a Figura 3.3 a), é perceptível qual o componente correspondente ao sol tanto pela forma arredondada como pelo tamanho, pois, se é o maior objecto, significa que é a maior área com um elevado nível de claridade, na imagem original. Assim sendo, neste caso, não é necessário aplicar filtros de mediana, o que atrasa muito o processo de procura do sol. No entanto é necessário ter acesso às características dos componentes.

Para se poder ter acesso às características dos componentes, é necessário tratar a imagem como um conjunto de objectos, pois até agora a imagem foi tratada apenas como imagem. Para tal, é necessário percorrer toda a imagem binária de forma a detectar todos os componentes ligados. Os pixéis que tiverem o valor 0, ou seja, os pixéis a negro, ficarão com a marca 0. Os que tiverem o valor 1, ou seja, os pixéis brancos, começarão a ser marcados com a marca 1. Todos os pixéis brancos adjacentes ao primeiro ficarão também com a mesma marca. Quando for encontrado um pixel branco que não seja adjacente aos marcados com a marca 1, será marcado com a marca 2 e assim sucessivamente. Ou seja, todos os componentes ligados serão marcados (Figura 3.4).

0	0	0	0	1
1	1	0	0	0
1	1	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	0	1	1

a)

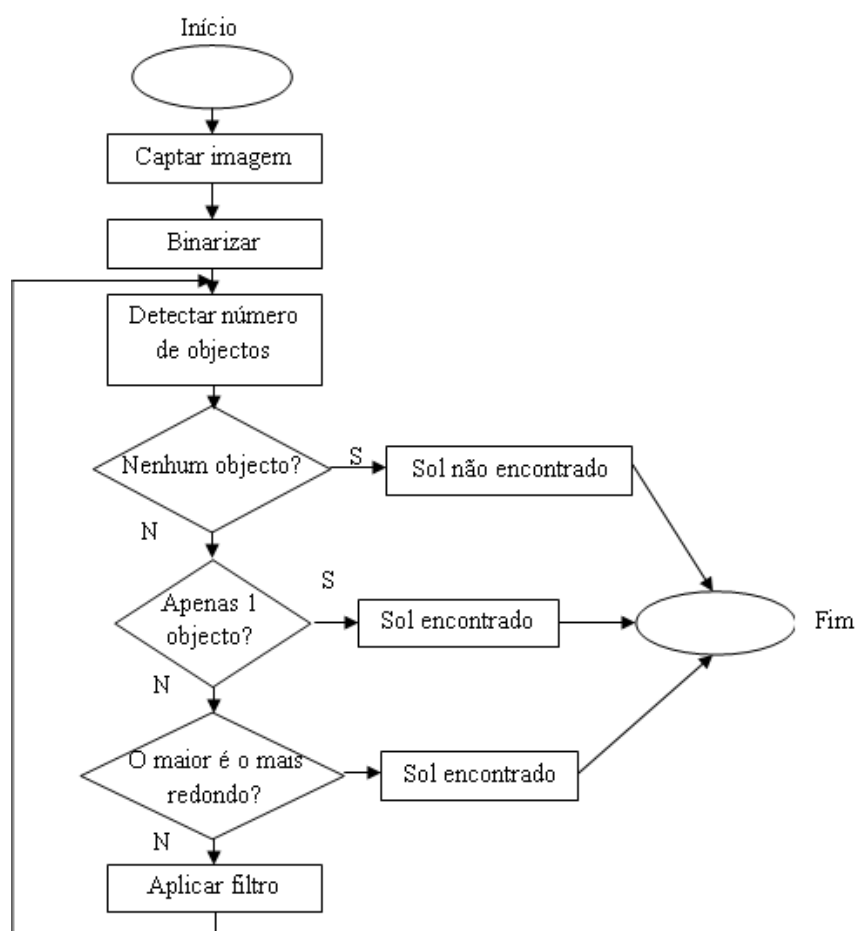
0	0	0	0	3
1	1	0	0	0
1	1	0	0	0
0	0	0	2	2
0	0	0	2	2

b)

**Figura 3.4: Esquema da marcação dos componentes ligados**

Como se pode observar pela Figura 3.4, se a imagem Figura 3.4 a) for a imagem binária, com três objectos brancos, após detectar todos os componentes ligados, a nova imagem será a ilustrada na Figura 3.4 b) que, como se pode observar, marca todos os componentes ligados.

Por esta altura, o objecto correspondente ao sol já se encontra isolado. No entanto, existem vários pixéis a formar o objecto sol e, visto que o objectivo é ter um sensor de elevada precisão, uma zona de pixéis não é suficiente para o que se pretende. Desta feita, é necessário encontrar o centro do sol. Para tal encontrou-se o centróide. Como já foi referido, caso haja mais do que um objecto, é possível que o correspondente ao sol seja, desde logo, detectável. Para tal, este deve ser o maior e mais arredondado, sendo para isso necessário calcular a área e a convexidade, respectivamente. Para uma melhor percepção atente-se no fluxograma do programa elaborado (Figura 3.5).



**Figura 3.5: Fluxograma do programa elaborado em Matlab**

Com a execução do programa, cujo fluxograma pode ser encontrado na Figura 3.5, o centro do sol é encontrado com sucesso, como se pode ver pela Figura 3.6.



**Figura 3.6: Centro do sol encontrado**

O procedimento aqui descrito, com o fim de encontrar o sol e o seu centro, foi uma primeira aproximação, com fotografias tiradas por outras câmaras. No entanto, ao testar a câmara que constitui o sensor (Figura 3.1 a) ) em condições reais, constatou-se que a imagem captada pela câmara vinha saturada, ou seja, devido à quantidade de luz existente, a imagem encontrava-se toda branca.

De forma a evitar a saturação da câmara, foram utilizados filtros de protecção solar. A adopção destes filtros (Figura 3.1 b) ), para além de precaver a saturação da câmara, tem uma grande contribuição na melhoria do desempenho do sensor, uma vez que elimina, à partida, muitos dos pontos luminosos que poderiam ser confundidos com o sol.

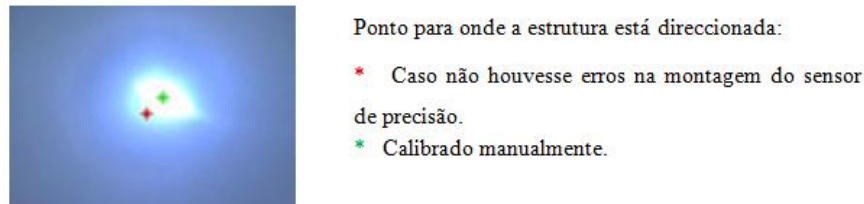
### **3.1.2.2 Procedimento para encontrar o ponto para onde está direccionada a estrutura**

Admitindo um erro nulo na montagem do sensor na estrutura, o que é difícil de alcançar, dada a elevada precisão do sensor, o ponto para onde está direccionada a estrutura seria, exactamente, o centro da imagem. Sabendo que a imagem recebida pela webcam tem um tamanho de 640x480 pixéis, é fácil descobrir que o centro da imagem corresponde ao ponto (320;240).

No entanto, neste trabalho, não se vai admitir que o sensor está perfeitamente montado na estrutura. Alternativamente, compensar-se-á esse erro admitindo que, manualmente, é possível alinhar perfeitamente a estrutura utilizando os tubos de precisão, explicados em detalhe no capítulo referente aos resultados. Os tubos de precisão, porém, podem também ter erros mas serão, seguramente, menos do que os provenientes do sensor de precisão, caso se admitisse um erro nulo na montagem do sensor na estrutura.

Admitindo, então, que a orientação manual da estrutura, através dos tubos de precisão, não tem erros, o procedimento para encontrar o ponto para onde está direccionada a estrutura consiste em encontrar o sol, numa altura em que a estrutura se encontre perfeitamente alinhada. Assim sendo, está-se, no

fundo, a calibrar o sensor de precisão. Na Figura 3.7 está representada esta situação. De notar que esta imagem é captada num instante em que a estrutura está manualmente alinhada. O ponto a vermelho indica o centro da imagem, ou seja, o ponto para onde a estrutura estaria direccionada caso não houvesse erros na montagem. Por sua vez, o ponto verde indica o centro do sol. Sabendo que a estrutura está perfeitamente alinhada, o ponto verde indica, para além do centro do sol, o ponto para onde a estrutura está, de facto, direccionada.



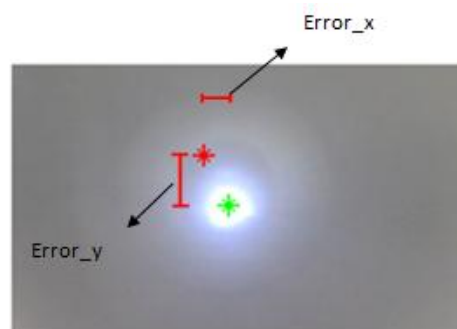
**Figura 3.7: Ilustração da calibração do sensor**

A partir deste momento, o sensor de precisão encontra-se calibrado.

Encontrados os dois pontos fundamentais, o centro da imagem e o centro do sol, fica a faltar descobrir o erro de seguimento da estrutura, que será nulo se os pontos coincidirem.

### 3.1.2.3 Procedimento para encontrar o erro entre o sol e a estrutura de seguimento

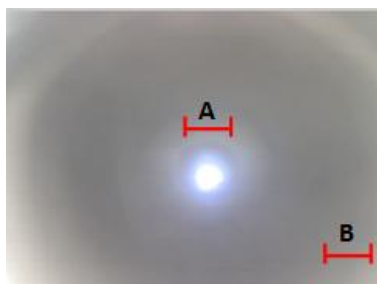
Para encontrar o erro de seguimento, nos dois eixos, entenda-se, tendo os dois pontos cruciais, ou seja, o centro do sol e o ponto para onde a estrutura está direccionada, ambos em pixéis, basta encontrar a diferença e ficamos com o erro de seguimento da estrutura em pixéis (Figura 3.8).



**Figura 3.8: Ilustração dos erros**

Para encontrar o erro, em graus, basta encontrar a correspondência entre o número de pixéis e o número de graus. Esta correspondência poderá não ser linear para toda a imagem, ou seja, a mesma distância, em pixéis, poderá não ter a mesma correspondência, em graus, se tiverem em lugares diferentes da imagem. Ou seja, como se pode observar pela Figura 3.9, a distância A e a distância B,

em pixéis, é igual mas, no entanto, em graus, poderá não o ser. Esta possível não-linearidade dever-se-á ao facto de a lente da webcam ser côncava e não plana.



**Figura 3.9: Possível não-linearidade em gamas diferentes da imagem**

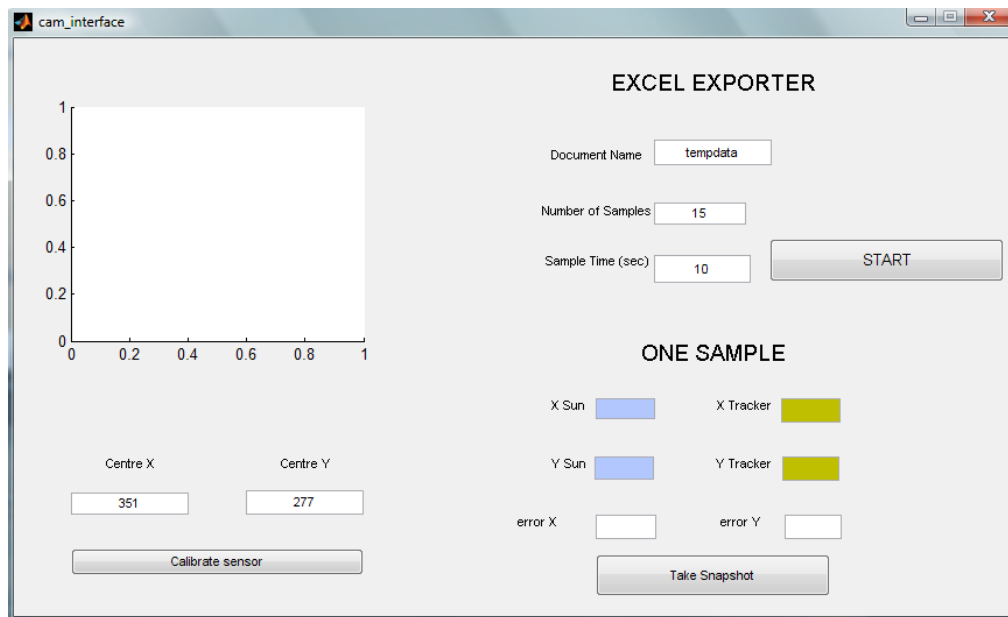
No entanto, mesmo que a correspondência não seja linear, o procedimento efectuado minimiza os possíveis erros provenientes deste aspecto. Ora, o sensor de precisão foi realizado com um objectivo específico: avaliar o desempenho de seguimento. Como tal, os valores interessantes encontrar-se-ão, sensivelmente, a meio da imagem, onde se encontra o centro do sol. Para uma aplicação cujo objectivo é avaliar a precisão de seguimento, como é o caso, não será relevante um erro de  $0,5^\circ$  na gama B, por exemplo. No entanto, seria grave um erro desta ordem na gama A.

Para tal, de modo a evitar erros desta natureza, optou-se por fazer a correspondência, sensivelmente, a meio da imagem. Para fazer a dita correspondência foi utilizada a aplicação gráfica desenvolvida em Matlab® e, como tal, uma explicação mais pormenorizada virá no subcapítulo a esta reservada.

### **3.1.3 Interface do sensor para o utilizador**

Foi desenvolvido um programa em Matlab® com o propósito de fazer com que a utilização do sensor baseado numa Webcam fosse acessível a qualquer membro da empresa.

O programa tem várias funcionalidades, sendo a primeira delas de extrema importância, visto que se trata da calibração do sensor. Ao montar o sensor no seguidor, existe uma grande probabilidade de este não estar perfeitamente alinhado com a estrutura. Para tal é possível calibrá-lo.



**Figura 3.10: Aspecto da interface**

Como atrás referido e explicado em detalhe no capítulo referente aos resultados obtidos, existe um modo de orientar manualmente a estrutura de seguimento. Para tal, existem uns tubos acoplados à estrutura de seguimento, os tubos de precisão, de modo a detectar a precisão com que a estrutura está direccionada para o sol.

Assumindo que os tubos de precisão não têm qualquer erro, alinha-se a estrutura através dos tubos de precisão e prime-se a tecla “*Calibrate Sensor*”. O programa vai encontrar o centro do sol e, a partir desse momento vai assumir que o sítio para onde a estrutura está direccionada é onde encontrou o sol. A partir deste momento o sensor está calibrado. Caso não se calibre o sensor, este vai ter valores por omissão, por exemplo, os valores referentes ao centro da imagem, que seria o sítio correcto caso o sensor estivesse perfeitamente alinhado com a estrutura.

Existe também a possibilidade de ver a precisão com que a estrutura se direcciona para o sol tirando apenas uma amostra. Premindo a tecla “*Take Snapshot*”, o programa vai encontrar o centro do sol e assinalar a sua ordenada em *XSun* e a sua abcissa em *YSun*, bem como o ponto para onde o seguidor está direccionado em *XTracker* e *YTracker*. Tendo estes pontos, o programa calcula o erro em X e Y da estrutura relativamente ao sol, ficando a ordenada do erro disponível ao utilizador em *errorX* e a abcissa em *errorY*. Para além de disponibilizar ao utilizador estas informações, mostra também (Figura 3.11) a imagem captada pela câmara bem como os dois pontos de interesse, o centro do Sol, a verde, e o ponto para onde o sistema está direccionado, a vermelho.

Para efeitos de se estudar um sensor novo ou um novo modo de seguimento, esta aplicação mostra-se muito útil pois tem também a opção de gravar toda a informação numa folha de Excel (Tabela 1).

Para tal basta introduzir o nome do ficheiro onde se deseja gravar a informação, bem como o número de amostras pretendidas e o espaçamento entre elas, em segundos, e premir “*Start*”.

**Tabela 1: Exemplo de escrita no Excel, em graus**

x_error	y_error	ano	mes	dia	hora	minuto	segundo
0,325	0,023	2010	9	19	11	6	23
0,377	0,023	2010	9	19	11	6	33
0,423	0,026	2010	9	19	11	6	43
0,487	0,039	2010	9	19	11	6	53
0,533	0,046	2010	9	19	11	7	3
0,567	0,051	2010	9	19	11	7	13
0,628	0,053	2010	9	19	11	7	23
0,681	0,056	2010	9	19	11	7	33
0,718	0,054	2010	9	19	11	7	43
0,761	0,057	2010	9	19	11	7	53
0,81	0,068	2010	9	19	11	8	3
0,867	0,085	2010	9	19	11	8	13
0,907	0,091	2010	9	19	11	8	23
0,966	0,095	2010	9	19	11	8	33
1,038	0,112	2010	9	19	11	8	43

Na folha de Excel, a informação disponibilizada tem o aspecto demonstrado na Tabela 1, mostrando a data e os erros em X e em Y, exemplo em que foram escolhidas várias amostras com taxa de amostragem de 10 segundo.

Esta ferramenta, como referido anteriormente, assim como informações do sistema já existente, foi utilizada, também para fazer a correspondência entre pixéis e ângulos. O sistema já existente informa o utilizador da posição da estrutura, em graus, através do Termite®. Por sua vez, o programa desenvolvido devolve a posição do sol em pixéis. A correspondência pode ser feita tirando dois “snapshots” com inclinações diferentes.

Como assinalado na Figura 3.11, após captar uma imagem, o programa devolve a posição do sol, em pixéis. No exemplo da figura, X<sub>Sun</sub>=349. Por sua vez, a Termite® devolve a posição do movimento horizontal da estrutura que, no exemplo ilustrado, é de X=103,4°.

Movimentando a estrutura apenas na horizontal, obtiveram-se valores de X<sub>Sun</sub>=298 e X=99,71°. Logo, a uma quantidade de 51 pixéis correspondem 3,69°, ficando, desta forma, feita a correspondência entre pixéis e graus.

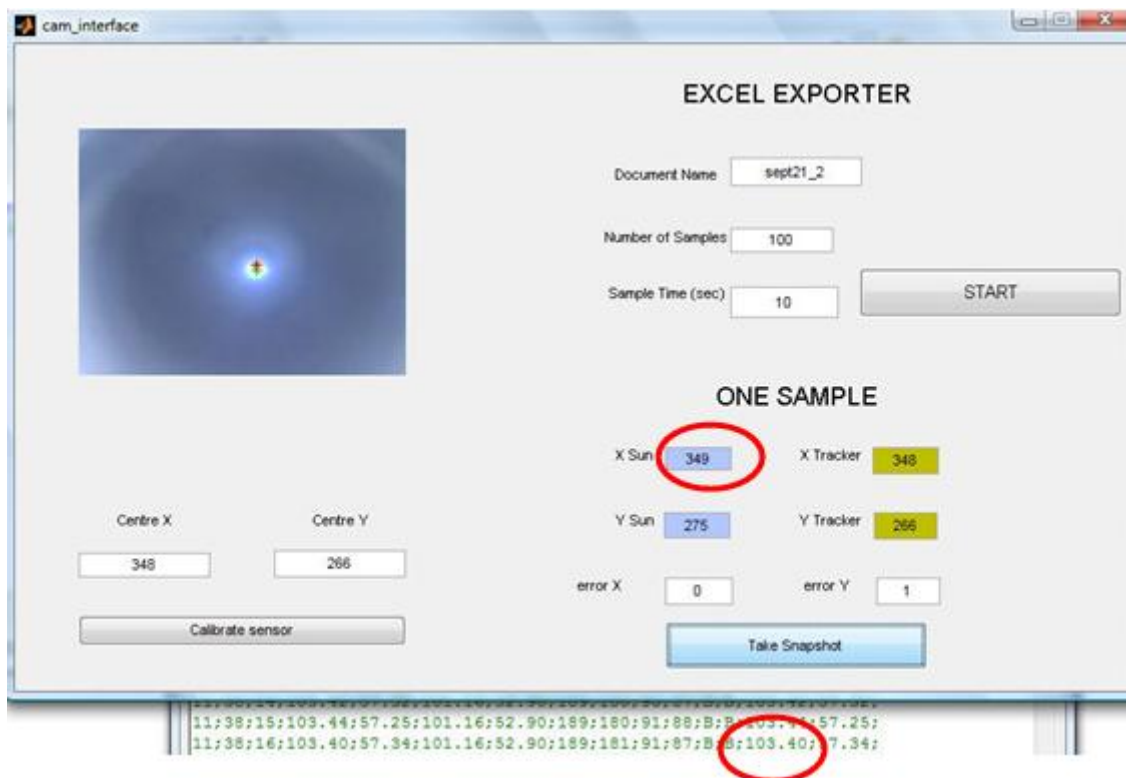


Figura 3.11: printscreen do ecrã podendo ver a posição do sol em pixéis e a posição da estrutura em graus

A partir deste momento é possível saber o erro em graus, apenas sabendo o erro em pixéis, como se pode observar pela seguinte equação:

$$erro_{graus} = \frac{erro_{pixéis} \times 3.69}{51}$$

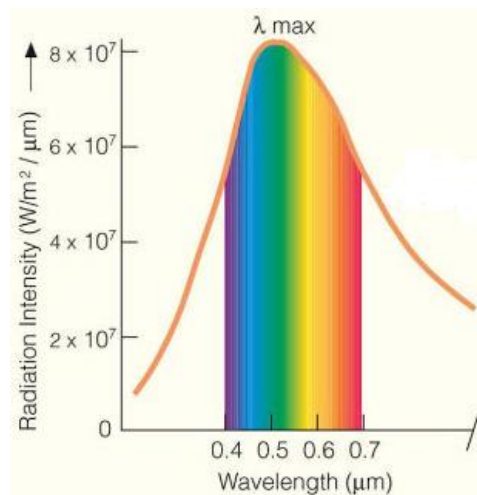
Esta é, então, a correspondência feita de modo a detectar o erro de seguimento em graus.

## 3.2 Sensor para seguimento

### 3.2.1 Análise de dispositivos fotossensíveis

A escolha de um ou mais dispositivos sensíveis à luz com o fim de realizar um sensor solar deve ter vários factores em conta. Um deles é certamente a capacidade de ler a luz solar. A luz proveniente do sol contém luz em vários espectros distintos (Figura 3.12).





**Figura 3.12: Espectro da radiação solar (Department of Energy, 2010)**

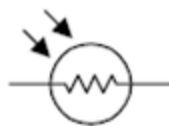
O esquema ilustrado na Figura 3.12 visa representar o espectro da luz proveniente do sol, sendo este composto por comprimentos de onda não visíveis mas também uma gama de comprimentos de onda visíveis, sendo esta entre os 0,4 e os 0,7 micrómetros.

“Os fótons são os mais pequenos pacotes de ondas de luz e a sua interacção com electrões é o mecanismo físico chave nos dispositivos optoelectrónicos.” (Piprek, 2003)

Os fótons, ao serem absorvidos por um material semiconductor, fazem com que seja gerada uma carga móvel. A condutividade eléctrica do material aumenta proporcionalmente ao fluxo de fótons. Ao ser aplicado um campo eléctrico ao material, através de uma fonte externa, faz com que os electrões e buracos sejam transportados. O resultado é uma corrente eléctrica mensurável. Os dispositivos fotossensíveis funcionam medindo ou a corrente, que é proporcional ao fluxo de fótons, ou a queda de tensão na resistência R colocada em série com o circuito (Saleh & Teich, 1991).

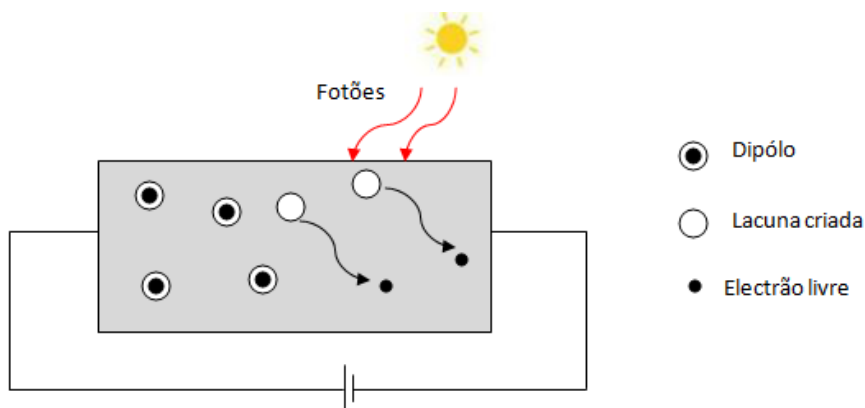
### **3.2.1.1 Fotoresistência**

A fotoresistência ou LDR (light dependent resistor) é, como o próprio nome indica, um dispositivo sensível à luz, que vê a sua resistência alterar quando, sobre ela, incide luz. Este dispositivo conta com um grande leque de valores possíveis de resistência, já que a mesma fotoresistência pode ter, no escuro, uma resistência de alguns mega ohm e, iluminada, poucas centenas de ohm. Uma característica interessante deste dispositivo é o facto de ser sensível ao mesmo espectro de luz do que o olho humano, sendo desta forma um bom sensor para detectar luz visível, sensivelmente de 0,4 e os 0,7 micrómetros (Figura 3.12). O símbolo da LDR é mostrado na Figura 3.13.



**Figura 3.13: Símbolo da fotoresistência**

Quando o dispositivo é colocado no escuro, os seus electrões não se movimentam através da resistência porque estão demasiado ligados. No entanto, quando iluminados, os fotões provenientes da luz colidem com os electrões, separando-os do átomo, o que faz com que sejam criadas lacunas no processo. Estes electrões libertados podem agora contribuir para o fluxo de corrente através do dispositivo, ou seja, a resistência diminui.



**Figura 3.14: Esquema de funcionamento da fotoresistência**

As fotoresistências de sulfeto de cádmio, cujo símbolo químico é  $\text{CdS}$ , respondem melhor a luz na gama dos  $0.4\mu\text{m}$  até aos  $0.8\mu\text{m}$ , enquanto que as de sulfeto de chumbo ( $\text{PbS}$ ) são mais indicadas para luzes infra-vermelhas. Como se pode observar pela Figura 3.12, a gama mais interessante para a detecção de luz solar é a gama detectada pelas fotoresistências de sulfeto de cádmio.

Para se poder medir a luz utilizando um microcontrolador, é necessário converter a resistência da LDR em tensão para que o conversor A/D (analógico/digital) a possa medir. Para tal utiliza-se uma montagem muito simples que dá pelo nome de divisor de tensão. Esta montagem, para além de ser muito simples de efectuar, torna também muito simples a medição da luz através da medição da tensão  $V_{\text{out}}$ . A montagem, tal como se mostra na Figura 3.15 a), faz com que  $V_{\text{out}}$  seja inversamente proporcional à luz incidente na LDR, isto é, quanto mais intensa for a luz incidente, menor o valor de  $V_{\text{out}}$ . Ou seja, se a luz incidente na LDR aumenta, a sua resistência diminui. Por sua vez, se a sua resistência diminui, a tensão de saída  $V_{\text{out}}$  também diminui (Figura 3.15 b). Ou seja, se a luz incidente aumenta,  $V_{\text{out}}$  diminui, logo,  $V_{\text{out}}$  é inversamente proporcional à luz incidente.

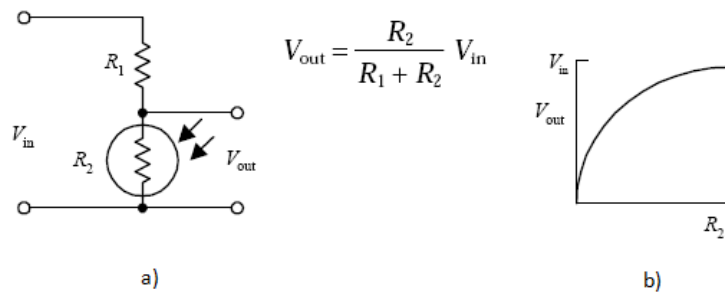


Figura 3.15: a) Esquema do divisor de tensão b) curva da tensão  $V_{out}$  em ordem ao valor de  $R_2$

Para um bom nível de precisão, deve-se ter atenção ao valor da resistência  $R_1$ , pois o valor desta resistência vai ter muita influência na precisão da leitura do valor de  $V_{out}$ , logo, da luminosidade. Para ter a maior precisão possível, deve-se ter a maior variação possível dentro dos níveis de luz a que o dispositivo vai estar sujeito.

### 3.2.1.2 Fotodíodo

O fotodíodo, cujo símbolo pode ser observado na Figura 3.16, é um dispositivo que converte energia luminosa directamente em corrente eléctrica. Se os dois terminais do fotodíodo forem ligados, pode-se constatar que, no escuro, não há passagem de corrente eléctrica mas, ao iluminar o dispositivo, começa a haver uma pequena corrente eléctrica a passar do cátodo para o ânodo (Scherz, 2000).

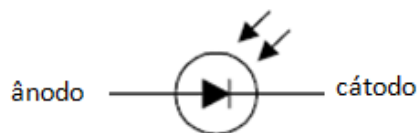
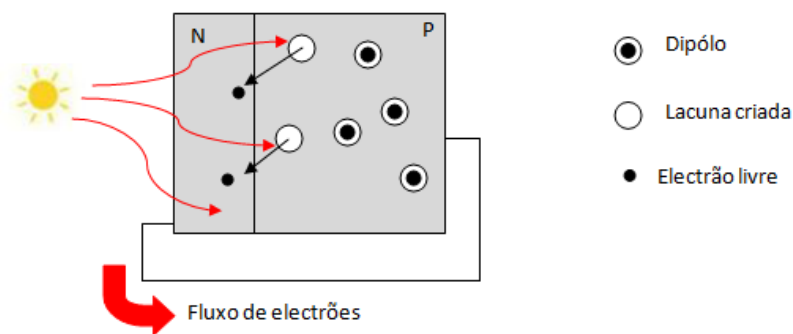


Figura 3.16: Símbolo do fotodíodo (Scherz, 2000)

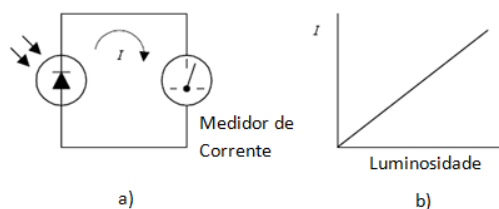
O fotodíodo é feito juntando uma camada muito fina de um semiconductor do tipo N com uma camada de um semiconductor do tipo P. A fronteira entre os materiais dos dois tipos tem o nome de junção PN (Malvino, 2000). O lado N é considerado o cátodo e o lado P é chamado de ânodo.

Ao iluminar o dispositivo, alguns fotões passam do lado N para o lado P, onde existem electrões e lacunas juntos formando aquilo a que se dá o nome de dipólos (Figura 3.17). Os fotões que chegam ao lado P vão colidir com os electrões que constituem os dipólos, desalojando-os e criando lacunas. Se estas colisões forem suficientemente perto da junção, os electrões desalojados vão atravessar para o lado N. Este processo cria excesso de electrões no lado N e excesso de lacunas no lado P. Se um fio for ligado entre o ânodo e o cátodo, há um movimento de electrões do cátodo para o ânodo.



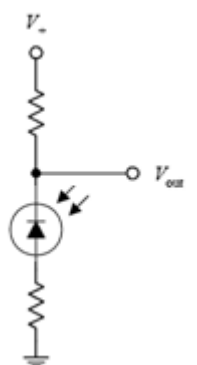
**Figura 3.17: Esquema de funcionamento do fotodíodo**

Desta forma, o fotodíodo converte luz em corrente eléctrica. A intensidade de luz e a corrente obtida são lineares, como se pode observar pela Figura 3.18.



**Figura 3.18: Linearidade entre a intensidade de luz e a corrente produzida**

Os fotodíodos, só por si, podem não produzir corrente suficiente para ser interpretada por um circuito. Normalmente são utilizadas fontes externas e o fotodíodo deve ser inversamente polarizado (Figura 3.19). No escuro, uma pequena corrente atravessa o dispositivo. No entanto, ao ser iluminado, o fotodíodo é atravessado por uma corrente mais elevada. O circuito mostrado na figura utiliza a fonte de tensão para aumentar a corrente. Para calibrar o circuito é costume utilizar uma resistência em série com o fotodíodo.



**Figura 3.19: Possível montagem para medir a intensidade de luz; adaptado de (Scherz, 2000)**

### 3.2.1.3 Fototransístor

Fototransístores são transístores sensíveis à luz. Um fototransístor comum consiste num transístor bipolar mas, com uma área sensível à luz em vez do terminal base. No escuro, praticamente não existe corrente a percorrer o dispositivo do colector para o emissor. No entanto, ao iluminar o dispositivo, é criada uma corrente de base, o que faz com que haja uma corrente muito maior do colector para o emissor (Figura 3.20).

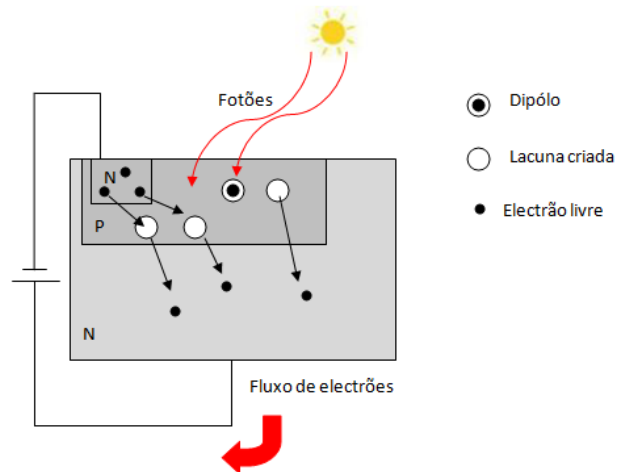


Figura 3.20: Esquema de funcionamento do fototransístor

O fototransístor bipolar assemelha-se a um transístor bipolar, com a diferença que um transístor tem três terminais, correspondentes ao emissor, base e colector e o fototransístor tem um terminal a menos, a base. Quando os fótons, provenientes de uma fonte de luz, colidem com os electrões da zona P, ganham energia suficiente para atravessar a junção PN. Enquanto os electrões passam da zona P para a zona N inferior, são criadas lacunas na zona P. Os electrões extra injectados na zona N inferior, são atraídos para o terminal positivo da bateria, enquanto que os electrões do terminal negativo da bateria são puxados para a zona N superior e atravessam a junção NP superior para se combinarem com as lacunas disponíveis na zona P. Desta forma é criada uma corrente que flui do emissor para o colector (no sentido real e não convencional).

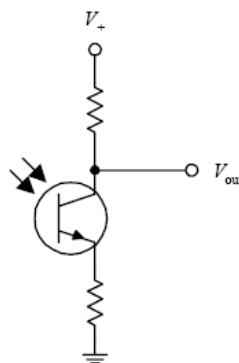


Figura 3.21: Possível montagem para medir a intensidade de luz (Scherz, 2000)

### 3.2.2 Testes a dispositivos

Para escolher um dispositivo para a elaboração de um sensor de luz foram feitos vários testes. Foram testados três tipos de dispositivos:

- Fotoresistências
- Fotodíodos
- Fototransístores

Como visto na secção anterior, onde são introduzidos estes três dispositivos, existem diversas maneiras de ler o valor de luminosidade destes dispositivos. Para a elaboração dos testes foi decidido utilizar a mesma montagem para todos os dispositivos, ou seja, o divisor de tensão (Figura 3.22).

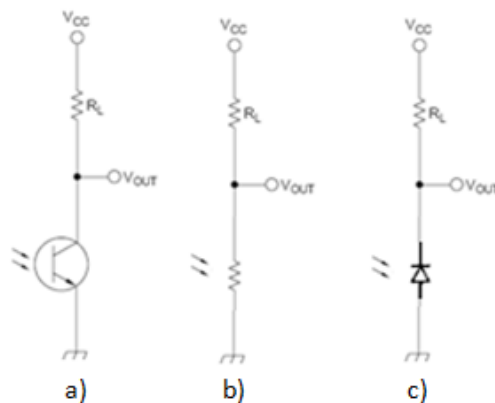


Figura 3.22: Esquema de montagem a) fototransístor b) fotoresistência c) fotodíodo

A montagem em questão, para além da simplicidade, tem outra grande vantagem; o facto de a resistência  $R_L$  estar em série com o dispositivo, permite uma certa calibração da leitura do valor de luminosidade, como se poderá constatar na visualização dos testes efectuados. Como já foi referido anteriormente, o modo como a montagem é feita, nos três dispositivos, faz com que o valor da tensão de saída  $V_{out}$ , seja inversamente proporcional à intensidade de luz captada pelo dispositivo.

Para além do tipo de dispositivos, foram também testados outros factores como, por exemplo, o valor da resistência associada ao divisor de tensão de cada dispositivo ( $R_L$ ).

Para a elaboração dos testes, recorreu-se a uma ferramenta que se mostrou de uma grande utilidade, o Arduino Duemilanove (Figura 3.23), um dispositivo que utiliza o microcontrolador da ATMEL, ATMEGA168. Tem 14 entradas/saídas, 6 entradas analógicas e ligação USB.

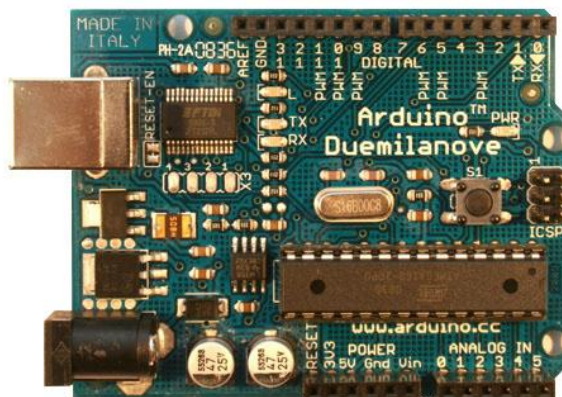
Nos testes a seguir descritos, foi elaborado um programa, em linguagem C para fazer a aquisição de dados dos diferentes dispositivos. Durante o tempo de teste, é lido o valor do divisor de tensão de cada um dos dispositivos, fotoresistência, fotodíodo e fototransístor e armazenado num vector de dados que vai ser lido em Matlab, para serem feitos gráficos para uma melhor visualização do resultado dos

testes. Este equipamento utiliza um conversor analógico-digital (ADC) de 10 bit. Como  $2^{10} = 1024$ , uma tensão entre 0 e 3,3V vai corresponder a um valor de 0 a 1023. O valor do ADC é encontrado desta forma:  $valor\ ADC = \left(\frac{V_{in}}{V_{ref}}\right) \times 1023$ .

O valor do bit menos significativo (LSB) é  $V_{LSB} = \frac{V_{ref}}{1023}$  [V].

Por exemplo, a tensão de 1V vai corresponder a um valor ADC de  $valor\ ADC = \left(\frac{V_{in}}{V_{ref}}\right) \times 1023$ , ou seja,  $valor\ ADC = \left(\frac{1}{3,3}\right) \times 1023$ , pelo que resulta  $valor\ ADC = 310$ . Confirmando, este valor corresponde a uma tensão de  $310 \times V_{LSB}$  [V], ou seja,  $310 \times \frac{3,3}{1023} = 1V$ . No decorrer deste trabalho, para uma melhor percepção do valor do ADC o valor dos dispositivos fotossensíveis virá na forma  $valor = [0..1023] \times V_{LSB}$  [V].

Este é o valor que vai ser armazenado no vector de dados. De recordar que o valor da tensão de saída ( $V_0$ ) de cada uma das montagens (Figura 3.22), correspondente ao valor da tensão de entrada do ADC ( $V_{in}$ ), é inversamente proporcional à intensidade de luz, logo, o valor de  $1023 \times V_{LSB}$  V, ou seja, 3,3V, corresponde a uma intensidade de luz muito baixa e o valor de 0 V corresponde a um valor de intensidade de luz muito elevado.



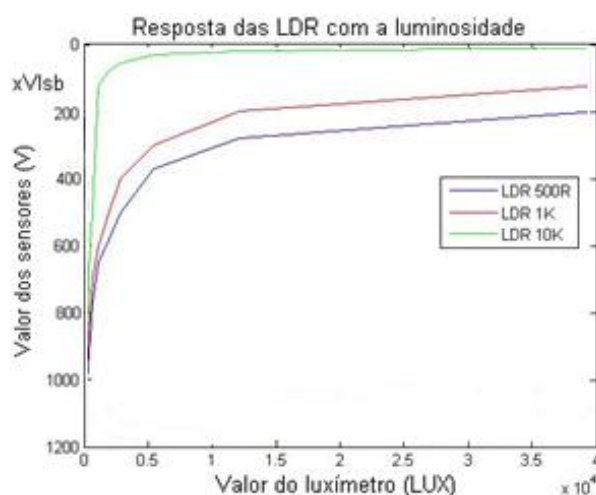
**Figura 3.23: Arduíno (arduino, 2010)**

Para uma melhor percepção na quantificação das medidas provenientes do conversor analógico-digital, foi elaborada uma tabela, na qual consta uma associação entre valores dados pelo conversor e valores de intensidade luminosa, em lux, dados por um luxímetro, como se pode observar pela Tabela 2.

**Tabela 2: Associação entre valores dos dispositivos e do luxímetro**

Valor LDR 500 $\Omega$ $\times V_{LSB}$ (V)	Valor LDR 1K $\Omega$ $\times V_{LSB}$ (V)	Valor LDR 10K $\Omega$ $\times V_{LSB}$ (V)	Valor Luxímetro (LUX)
200	120	10	40000
280	200	20	12000
370	300	30	5300
500	411	55	2700
580	500	80	1800
650	600	120	950
770	700	500	470
880	800	600	300
1023	1023	1023	0

Como se pode observar pela tabela, são comparados os valores de fotoresistências idênticas mas com diferentes valores de  $R_L$  (Figura 3.22). A partir da tabela foi elaborado um gráfico (Figura 3.24) que, para além de ilustrar a resposta da fotoresistência à intensidade de luz, tem como objectivo estabelecer um termo de comparação entre o valor do dispositivo lido e o nível de luminosidade. Uma vez que nos testes elaborados neste capítulo estará sempre uma das montagens ilustradas no gráfico, é sempre possível estabelecer uma correspondência entre o valor do dispositivo em causa e o valor de luminosidade, em *lux*.

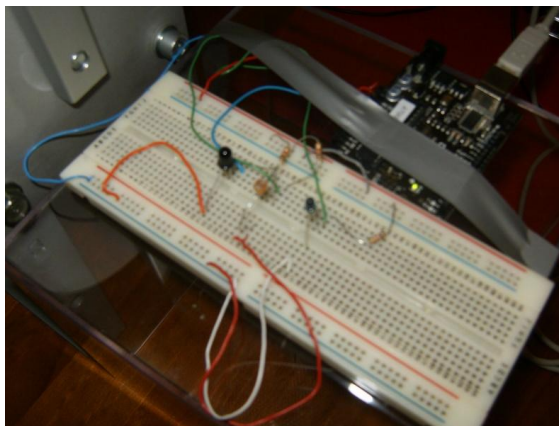


**Figura 3.24: Associação gráfica entre os valores dos dispositivos e do luxímetro**

Como se pode observar pelo gráfico (Figura 3.24), o maior valor de luminosidade registado foi de 40000 *lux*, valor obtido submetendo, quer as fotoresistências, quer o luxímetro à luz directa do sol. Foi observado que, submetendo os dispositivos e o luxímetro a uma lâmpada de 120 W, a 15 cm desta, os valores eram muito semelhantes, o que demonstra a possibilidade de tirar ilações a partir de testes elaborados a partir desta lâmpada. Diminuindo a intensidade de luminosidade da lâmpada, através de um reóstato, foram registados os restantes valores.



A aquisição de dados dos dispositivos é feita, como mostra a Figura 3.25, com os três dispositivos dispostos em linha e à mesma altura, de modo a poder fazer-se a aquisição de dados em simultâneo e com o máximo de igualdade de condições possível.



**Figura 3.25: Montagem para fazer a aquisição de dados através do Arduino**

#### **3.2.2.1 Teste à variação de intensidade de luz**

O teste consiste em ter a lâmpada apagada num quarto escuro, não sendo portanto possível para os dispositivos, a detecção de luz. Durante o teste há uma suave variação da luz até ao máximo de luz possível para a lâmpada e em seguida um decréscimo até estar novamente apagada.

O valor de luminosidade dos dispositivos é o valor do divisor de tensão, depois de passar no conversor analógico-digital, que varia entre 0 e 1023, sendo que o valor 0 corresponde ao valor máximo de luz que o dispositivo consegue captar e o valor 1023, correspondente ao valor mínimo.

O objectivo do teste é ver a resposta à variação da intensidade da luz dos diferentes dispositivos consoante a sua resistência associada (Figura 3.26). Com este teste pretende-se encontrar um dispositivo, e respectiva resistência para ser montada em série, que tenha uma resposta sem ruído e que percorra uma boa parte da gama possível, ou seja, quando a luz estiver apagada, o dispositivo deverá acusar um valor de 1023 e, quando a luz estiver no máximo, deverá acusar um valor muito baixo.

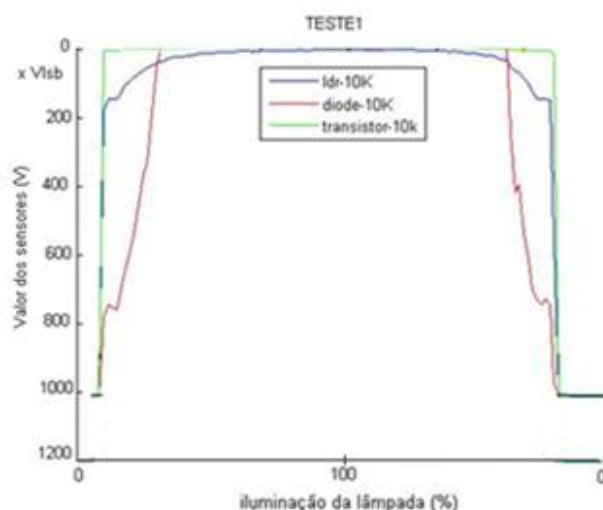


**Figura 3.26: Teste à variação de intensidade de luz**

Para a elaboração deste teste foi utilizada uma lâmpada de 120W com um reóstato a ela associado, permitindo, desta forma, variar a intensidade de luz. Foi também utilizado um sistema de suporte da lâmpada com capacidade de rotação até 90°, uma fotoresistência, um fotodíodo e um fototransistor, seis resistências de 1K $\Omega$  e três resistências de 10K $\Omega$ . Para a aquisição de dados foi utilizado o microcontrolador ATMEGA168.

Neste teste, a lâmpada encontra-se a 90° relativamente aos três dispositivos, que se encontram na base deste a uma distância de 15cm.

#### **3.2.2.1.1 Com uma resistência em série de 10K $\Omega$**

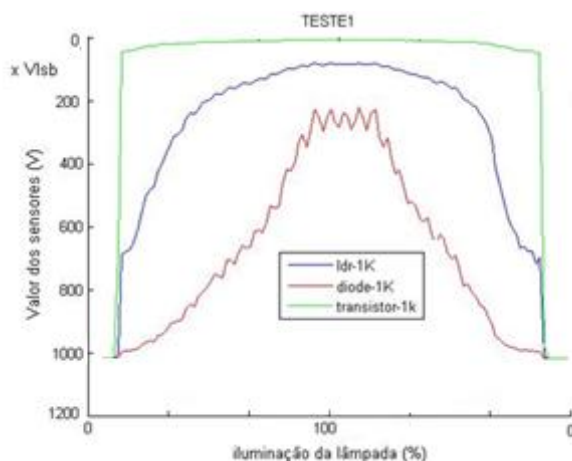


**Figura 3.27: Teste à variação de intensidade de luz com uma resistência de 10K $\Omega$**

Observando a Figura 3.27, é fácil de perceber que, com uma resistência de 10K $\Omega$ , o nível de luminosidade não é perceptível pelos dispositivos, ou seja, os dispositivos não têm a sensibilidade à luz que se deseja. Nota-se que existe como que um limiar que separa o valor 0 e o valor 1023, ou seja, se a intensidade de luz for menor que o dito limiar, o dispositivo tem o valor de 1023 e, se for maior, o dispositivo tem o valor de 0.

Todos os dispositivos têm uma resposta abrupta ao nível de luminosidade, todos eles ficam com o valor zero antes de a lâmpada estar no máximo da sua luminosidade, ou seja, grande parte da variação da luminosidade não é sentida pelo dispositivo.

### 3.2.2.1.2 Com uma resistência em série de $1K\Omega$



**Figura 3.28: Teste à variação de intensidade de luz com uma resistência de  $1K\Omega$**

Como se pode observar pela Figura 3.28, a um nível global, as respostas assemelham-se mais ao que se deseja, em comparação com as respostas dos dispositivos com uma resistência de  $10K\Omega$ . Nota-se que a resposta do fotodíodo é muito ruidosa e a do fototransístor, tal como no teste anterior, tem uma resposta muito brusca. Por outro lado, a resposta da fotoresistência parece ser a desejada, ou seja, suave e ocupando grande parte da sua gama de variação. No entanto não ocupa toda a gama, o que é também uma vantagem pois o seu valor mínimo (correspondente à máxima intensidade de luz), deverá ocorrer quando está a ser directamente iluminado pelo sol. Como se pode observar pela Tabela 2, o valor correspondente à fotoresistência, com uma resistência de  $1K$ , quando iluminada pelo sol, é de 120. No entanto, convém que haja uma gama valores de maior luminosidade, de modo a que o dispositivo seja capaz de sentir luminosidades maiores, para quando o sol estiver mais forte. Ou seja, a fotoresistência seria ainda sensível a mais intensidade de luz do que aquela que a lâmpada é capaz de produzir.

Concluindo, com uma resistência de  $1K\Omega$ , as respostas dos dispositivos traduzem melhor a variação do nível de luminosidade. Particularizando, o fototransístor tem uma resposta muito abrupta e não consegue detectar grande parte da variação de luz. Por outro lado, o fotodíodo é sensível a toda a gama de variação da luz mas contém muito ruído e varia pouco na sua gama, o que se pode traduzir numa fraca sensibilidade. Finalmente, a fotoresistência (LDR) é sensível a toda a gama de luminosidade da lâmpada e “utiliza” a sua gama quase toda para a traduzir de uma forma suave.

### 3.2.2.1.3 Com uma resistência em série de 500 $\Omega$

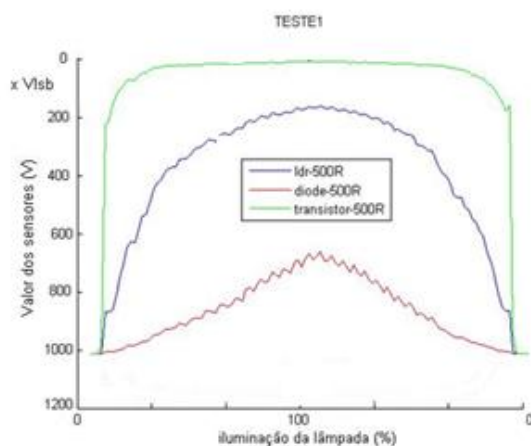


Figura 3.29: Teste à variação de intensidade de luz com uma resistência de 500 $\Omega$

Com este teste pode-se concluir sensivelmente o mesmo do que no anterior, embora as respostas dos dispositivos reflectam uma menor sensibilidade dos mesmos, uma vez que utilizam uma menor parte da sua gama.

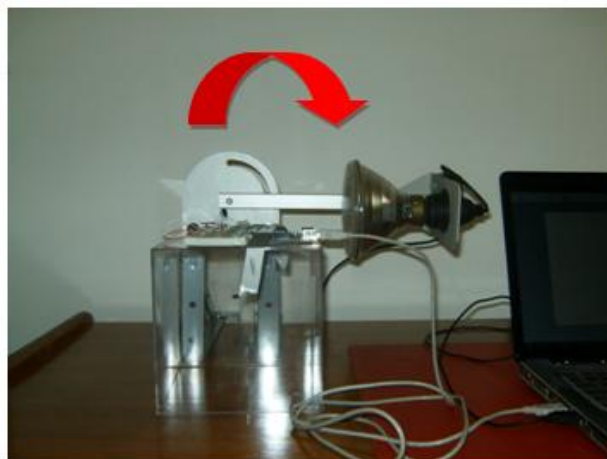
### 3.2.2.1.4 Conclusão acerca do teste de variação de intensidade de luz

O fototransístor tem uma resposta muito brusca à variação de luz. O seu valor é muito alto até um certo valor de luminosidade e, a partir desse valor, passa a ser muito baixo. Pode ser muito útil para certas aplicações, por exemplo, para saber se o dispositivo está a ser iluminado ou não. Por outro lado, o fotodíodo tem uma resposta com muito ruído e varia pouco com o nível de luminosidade. A fotoresistência tem uma resposta muito suave e varia em quase toda a sua gama de valores. A resposta é muito boa quando se utiliza, quer uma resistência de 1K $\Omega$ , quer uma resistência de 500 $\Omega$ . Observando o aspecto das curvas, a fotoresistência com uma resistência de 500 $\Omega$  parece ter uma resposta mais suave; no entanto foi escolhido o valor de 1K  $\Omega$  pois ocupa uma maior gama, o que se traduz numa maior precisão. Por outro lado, a gama em que a resposta é pouco linear é uma gama de pouca luminosidade (0-300 *lux*), o que, numa aplicação em que o objectivo é o de fazer seguimento solar, uma detecção precisa desta gama não é crucial.

Para uma aplicação em que os dispositivos estejam no exterior, sujeitos a uma luminosidade idêntica, as fotoresistências podem ter uma melhor prestação. No entanto, se se pensar numa aplicação, por exemplo, dentro de um tubo, onde há apenas uma pequena abertura, definindo um limite apropriado, a utilização de um dispositivo com uma resposta mais abrupta pode trazer vantagens.

### 3.2.2.2 Teste à variação do ângulo de incidência

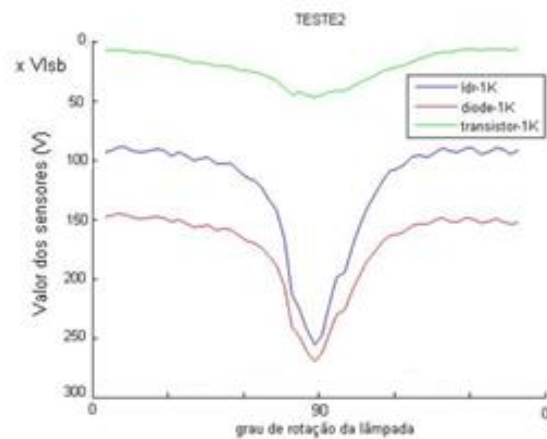
O teste consiste em ter a lâmpada a 0°, a 15 cm dos dispositivos mas, desta vez, com a iluminação constante. O teste tem a duração de sessenta segundos, durante os quais há uma variação ligeira do ângulo de incidência de luz até aos 90°, estando portanto incidindo lateralmente nos dispositivos, e um retorno da lâmpada até à posição inicial (Figura 3.30).



**Figura 3.30: Imagem do teste de variação do ângulo de incidência**

Para a elaboração deste teste foi utilizada uma lâmpada de 120W com um reóstato a ela associado, permitindo, desta forma, variar a intensidade de luz. Foi também utilizado um sistema de suporte da lâmpada com capacidade de rotação até 90°, uma fotoresistência, um fotodíodo, um fototransístor e três resistências de 1K $\Omega$ . Para a aquisição de dados foi utilizado o microcontrolador ATMEGA168.

O teste em questão foi feito com o objectivo de ver a resposta à variação do ângulo de incidência da luz dos diferentes dispositivos. A resposta desejada será uma resposta que varie bastante com o ângulo de incidência.



**Figura 3.31: Teste de variação do ângulo de incidência com uma resistência de  $1K\Omega$**

Na Figura 3.31 estão representadas as curvas de resposta dos diferentes dispositivos à rotação da luz. Como se pode observar, todos eles são sensíveis à rotação da lâmpada, embora com diferentes níveis de sensibilidade. De notar que o fototransistor (a verde), tem muito pouca sensibilidade comparando com a fotoresistência (a azul), que mostra uma grande sensibilidade à rotação da lâmpada.

#### **3.2.2.2.1 Conclusão acerca do teste à variação do ângulo de incidência**

Com este teste foi possível verificar a resposta dos dispositivos à variação do ângulo de incidência de luz.

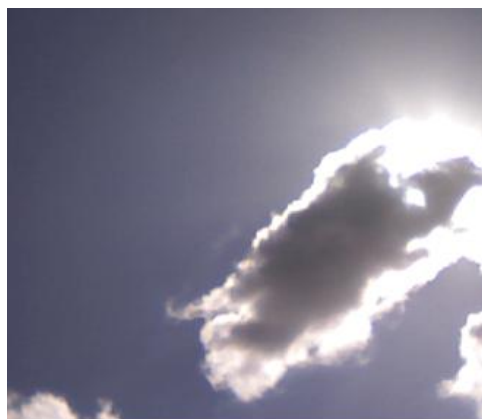
O fototransistor revelou-se pouco sensível à variação do ângulo de incidência de luz. Por outro lado, tanto o fotodiodo como a fotoresistência se revelaram bastante sensíveis.

Numa aplicação em que a orientação é feita através da comparação de dispositivos, é muito útil que os dispositivos que a integram sejam sensíveis ao ângulo de incidência.

Com a elaboração deste teste, fica demonstrado que a fotoresistência, com uma resistência de  $1K\Omega$ , é bastante sensível ao ângulo de incidência da fonte de luz.

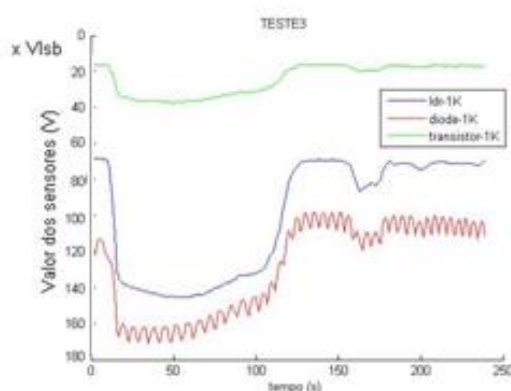
#### **3.2.2.3 Teste em condições reais**

O presente teste, com a duração de quatro minutos, foi feito com a luz solar directa para uma boa percepção da influência das nuvens na resposta dos diferentes dispositivos. Com este teste pretende-se encontrar um dispositivo que tenha uma boa sensibilidade às nuvens (Figura 3.32).



**Figura 3.32: Fotografia do céu no dia do teste em condições reais**

Para a elaboração deste teste foi utilizada uma fotoresistência, um fotodíodo, um fototransístor e três resistências de  $1K\Omega$ . Para a aquisição de dados foi utilizado o microcontrolador ATMEGA168.



**Figura 3.33: Teste com resistências de  $1K\Omega$**

### 3.2.2.3.1 Conclusões acerca do teste

Observando a Figura 3.33, pode-se observar que todos os dispositivos são sensíveis à passagem de nuvens. No entanto as respostas são todas distintas, destacando-se a resposta da fotoresistência (a azul) pela sua suavidade e grande sensibilidade às nuvens.

Resumindo, tal como nos testes anteriores, o fotodíodo tem uma resposta muito ruidosa. O fototransístor tem uma resposta aceitável mas é pouco sensível às nuvens, ou seja a resposta às variações de luz é relativamente pequena. A fotoresistência, tal como nos testes anteriores, tem uma boa resposta, sendo bastante sensível a nuvens, tais como a mostrada na Figura 3.32.

### 3.2.2.4 Conclusões acerca de todos os testes

A elaboração de todos estes testes permitiu avaliar todos os dispositivos bem como a influência da resistência que faz parte da montagem do divisor de tensão (Figura 3.22). Com base nestes testes concluiu-se que o fotodíodo apresenta uma resposta mais ruidosa do que os seus concorrentes em todos os testes, não sendo uma boa escolha para nenhuma aplicação. Por outro lado, o fototransistor apresenta uma resposta muito abrupta ao diferenciar os níveis de luminosidade, esgotando toda a sua gama de sensibilidade, o que faz com que sature facilmente. A fotoresistência apresenta uma resposta muito boa em todos os testes, sendo sensível ao ângulo de incidência de luz e às nuvens. Uma vez que a fotoresistência tem uma boa prestação em todos os testes que partilha o divisor de tensão com a resistência de  $1K\Omega$ , este é o valor indicado para fazer par com a fotoresistência.

Com base nas conclusões tiradas dos testes efectuados, pode-se pensar em algumas aplicações úteis.

Para uma aplicação de comparação de valores de luminosidade, a melhor opção será a fotoresistência, bem como a resistência de  $1K\Omega$ . Em conjunto, estes dois dispositivos têm uma resposta “limpa”, ou seja, com pouco ruído, e uma boa sensibilidade, tanto ao ângulo de incidência da luz, bem como às nuvens (Figura 3.34).

Para uma aplicação em que o sensor sirva apenas para detectar se o sensor está bem direccionado para o sol, o fototransistor, em conjunto com uma resistência de  $10K\Omega$ , será uma boa opção (Figura 3.35 a)).

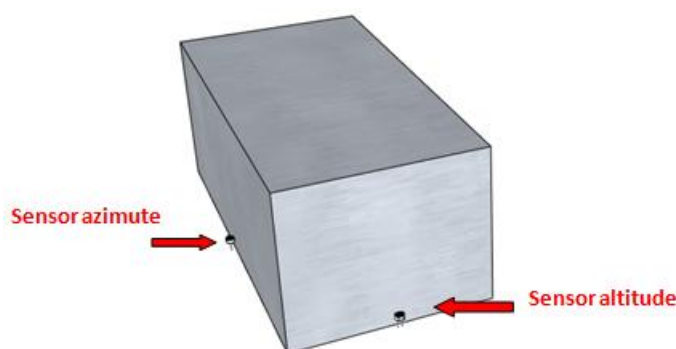
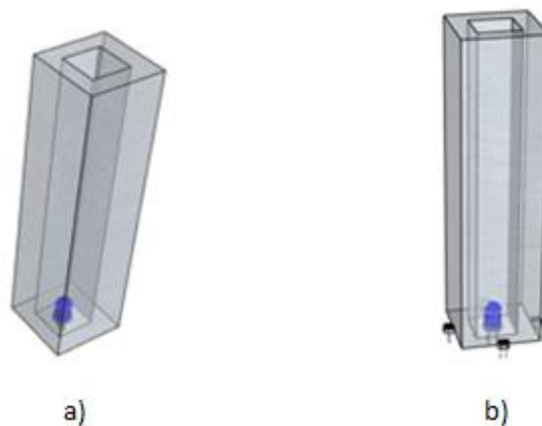


Figura 3.34: Sensor baseado em comparação de dispositivos

Uma outra hipótese será juntar as duas aplicações e desenvolver um sensor como o que se mostra na Figura 3.35 b)).





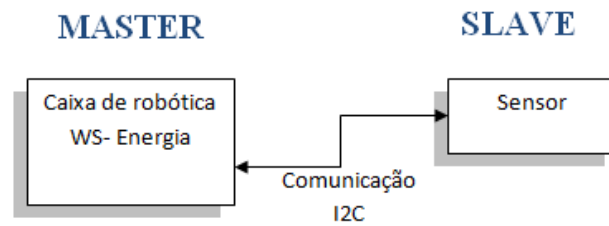
**Figura 3.35: Duas hipóteses para sensores: a) com um fototransísttor b) Com um fototransísttor e quatro fotoresistências**

### **3.2.3 Placa de aquisição de dados**

Para o desenvolvimento de um sensor de luz é necessário que este seja capaz de ler dispositivos fotossensíveis, tais como fotoresistências, fotodíodos ou fototransísttores. Como foi referido anteriormente, a aquisição de informação da intensidade de luminosidade que está a incidir em cada dispositivo fotossensível, vai ser feito através da medição da queda de tensão na resistência que está em série com o dispositivo. Ora, sendo a queda de tensão um valor contínuo e sendo necessário que essa informação seja tratada por um dispositivo digital, é necessário que haja um conversor analógico-digital. Ou seja, é necessário que o sensor tenha entradas para o conversor analógico-digital, também chamadas entradas analógicas.

O sensor a ser construído deve, portanto, possuir entradas analógicas, pelo menos tantas como o número de dispositivos que se deseja ler. Por outro lado, para o sensor ser utilizado pela robótica da WS- Energia®, este deve ter comunicação I2C. Para preencher tais requisitos, decidiu-se optar pelo PIC 18f4420, que conta com treze entradas disponíveis para o conversor analógico-digital de 10 bit e comunicação I2C.

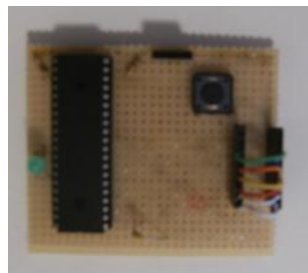
A comunicação entre os dois dispositivos, ou seja, entre a caixa de robótica e o sensor, deve obedecer a uma arquitectura Master- Slave, ou seja, a caixa de robótica (Master) funciona com normalidade e, quando necessário, solicita a participação do sensor (Slave) (Figura 3.36).



**Figura 3.36: Esquema global do sistema**

A placa de aquisição de dados foi elaborada para integrar o sensor, contendo apenas o necessário para o seu funcionamento. No entanto, face à possibilidade de ler outros sensores de uma forma simples, foi elaborada uma placa, ilustrada na Figura 3.37, com oito entradas analógicas e comunicação I2C. Para a leitura de outros sensores, basta que estes tenham a sua resposta em tensão, não superior à tensão de alimentação do pic (3,3V).

Para o desenvolvimento desta placa foi necessário programar tanto o pic 18f4420 como o pic da caixa de robótica (PIC24FJ256GB110).



**Figura 3.37: Fotografia de uma das placas desenvolvidas**

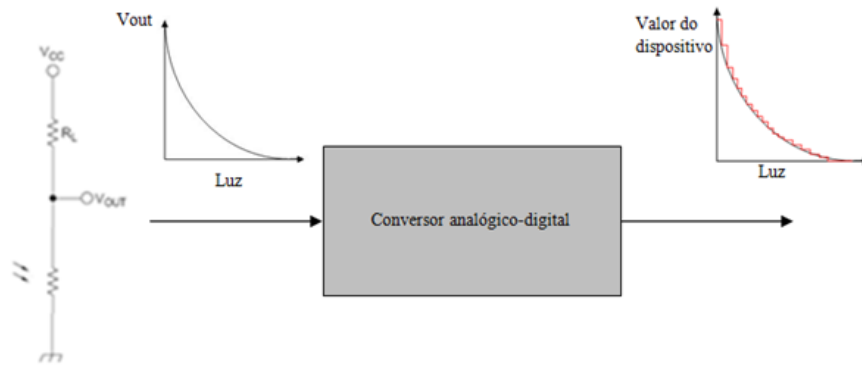
### 3.2.3.1 Conversor Analógico-Digital

Um conversor analógico-digital (ADC) é utilizado para converter um nível de tensão (analógico) num número (digital) que representa a tensão. Basicamente, um ADC tira a relação entre uma tensão de entrada e uma tensão de referência e representa-a através de um número. Este número depende do número de bits de resolução do ADC. Por exemplo, a resolução de 10 bit do pic escolhido significa que existem 1024 ( $2^{10} = 1024$ ) valores disponíveis para representar uma tensão que varia entre 0V e a tensão de referência. Como a tensão de alimentação disponível é de 3,3V, essa será a tensão de referência, logo, uma tensão de entrada de 3,3V corresponderá a  $1023 \times V_{LSB}$  V, uma tensão de 0V a 0 e, por exemplo, uma tensão de 1V corresponderá a um valor de :

$$ADCvalue = \left(\frac{1}{3,3}\right) \times 1023$$

$$ADCvalue = 310 \times V_{LSB} V$$

Para uma melhor percepção do funcionamento do conversor analógico-digital do sensor de luz, atente-se na Figura 3.38.



**Figura 3.38: Esquema do conversor analógico-digital**

Como se pode observar pela Figura 3.38, todo o processo se inicia na montagem do divisor de tensão, de modo a ler o valor  $V_{out}$ . Como já foi referido, nesta montagem, a queda de tensão ( $V_{out}$ ) e a quantidade de luz incidente no dispositivo fotossensível, são inversamente proporcionais. No conversor analógico-digital a queda de tensão de 0V a 3,3V é transformado num valor de 0 a 1023 e será esse o valor de luminosidade que vai ser comparado com os outros dispositivos fotossensíveis.

### 3.2.3.2 Funcionamento da placa de aquisição de dados

A placa de aquisição de dados é programada em linguagem C utilizando o software MPLAB bem como o programador ICD3 da Microchip®.

Para a placa de aquisição de dados ler, por exemplo, quatro fotoresistências, é necessário ler o valor de cada uma, passá-las pelo conversor analógico-digital, de modo a obter um valor entre 0 e 1023 e, em seguida, enviar os valores adquiridos para o *Master* da comunicação I2C.

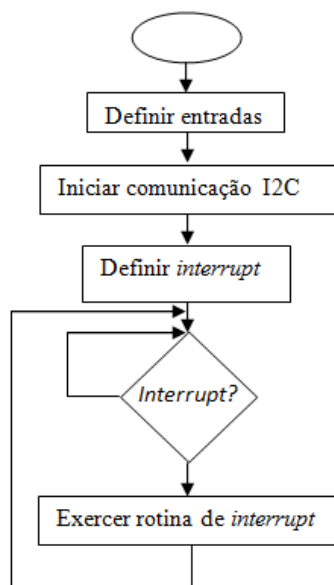
Como a placa de aquisição de dados vai ser um *Slave* na comunicação I2C, não vai tomar qualquer iniciativa em começar a comunicar. A sua função, antes de ser solicitada a sua participação pelo *Master*, é de configurar o PIC de acordo com a utilização em causa. Ora, a utilização em causa consiste numa placa que lê o valor de luminosidade de quatro fotoresistências e envia a respectiva informação para o *Master*. Logo, a primeira acção a ser feita é definir os pins, ao qual estão ligadas as

fotoresistências, como entradas. Em seguida há que definir o conversor analógico-digital, tal como definir a tensão de referência de 3.3V, e configurar a comunicação I2C. Estando todas as configurações feitas, o PIC não fará nada a não ser que o *Master* tenha a iniciativa de comunicar com esta placa.

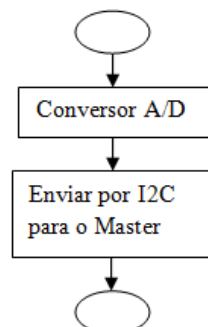
A iniciativa de comunicar por parte do *Master* traduz-se por meio de um *interrupt*. Um *interrupt* consiste num sinal que é activado, informando o processador que deve interromper a acção actual, para assim poder correr a rotina de *interrupt*, ou seja, para responder de forma adequada à interrupção feita.

Este *interrupt* é gerado quando o dispositivo *Slave* detecta que o *Master*, na linha I2C, pretende comunicar consigo. Entrando na rotina do *interrupt*, o *slave* deverá passar o valor de cada uma das entradas, as quais estão ligadas às fotoresistências, pelo conversor A/D e enviar o seu valor pela linha I2C para o *Master*, terminando a comunicação. Terminada a rotina de *interrupt*, o PIC permanecerá novamente à espera que o *Master* deseje novamente comunicar. A Figura 3.39 visa exemplificar o funcionamento do sensor com base num fluxograma.

**Rotina Main:**



**Rotina Interrupt:**



**Figura 3.39: Fluxogramas de funcionamento da placa de aquisição de dados**

Como se pode observar pela Figura 3.39, o funcionamento da placa de aquisição de dados é muito simples, baseando-se, apenas, em ler o valor dos vários dispositivos e enviá-lo ao *Master*.

### 3.2.4 Construção do sensor

O primeiro sensor elaborado é um sensor muito simples, baseado na diferenciação de níveis de luminosidade dos sensores em quadratura. São utilizadas quatro fotoresistências, duas para fazer a diferenciação de níveis de luminosidade no movimento azimuthal e duas para o movimento de altitude. São utilizadas quatro resistências de  $1K\Omega$ , pois, como visto nos testes feitos, são um bom valor para acoplar à fotoresistência. Foi utilizada uma caixa, como a representada na Figura 3.40.

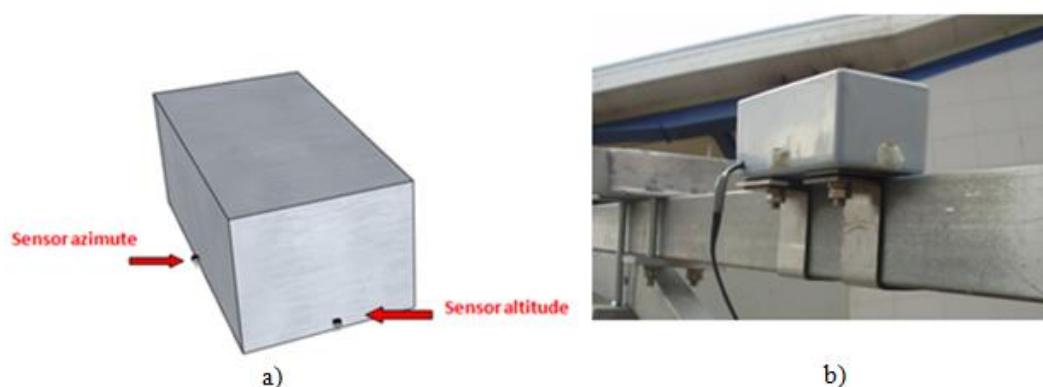


Figura 3.40: a) Esquema do sensor b) fotografia do sensor montado na estrutura.

As fotoresistências encontram-se a meio de cada uma das faces, como representado na Figura 3.40. No interior encontra-se o PIC 18f4420, que faz a aquisição de dados de cada um dos dispositivos. A partir do PIC sai um cabo composto por quatro fios, dois de alimentação e dois para a comunicação I2C, como ilustrado na Figura 3.41.

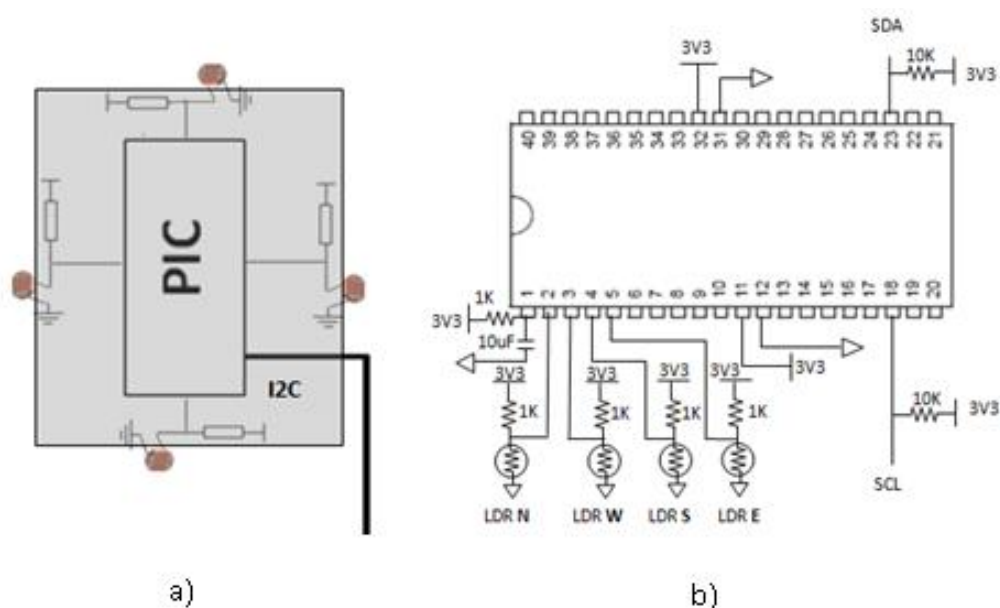
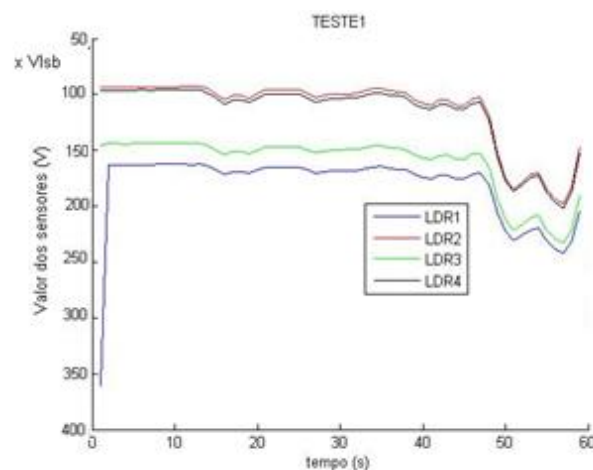


Figura 3.41: a) Esquema interior do sensor para seguimento b) esquema de ligações

Uma vez que o funcionamento deste sensor se baseia na comparação dos seus valores de luminosidade, é crucial que estes sejam idênticos. Para efectuar tal escolha foram feitos vários testes com os dispositivos dispostos ao sol. A Figura 3.42 mostra o resultado de um teste com a duração de um minuto e, como se pode observar, existem quatro fotoresistências cuja resposta é idêntica mas duas em particular, intituladas LDR2 (a vermelho) e LDR4 (a preto), cujas respostas são extremamente parecidas, tendo sido estas escolhidas para incorporar o sensor num dos eixos. Para o outro eixo, procedeu-se a testes semelhantes dos quais resultaram mais duas fotoresistências extremamente parecidas. As fotoresistências são muito semelhantes duas a duas, o que não implica que sejam as quatro idênticas.



**Figura 3.42: Exemplo de resultado do teste**

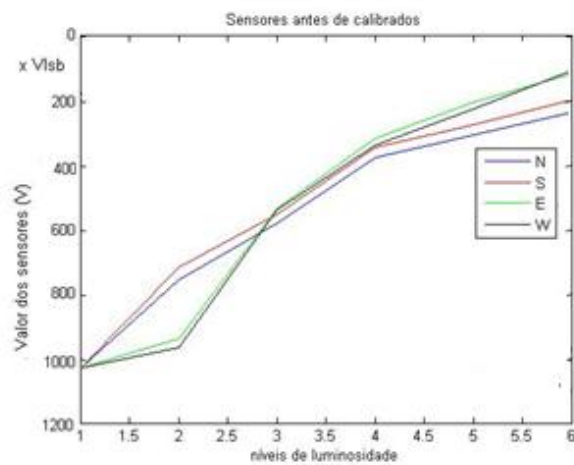
De modo a garantir que os componentes sejam o mais idênticos possível, para além de se escolherem os mais parecidos, convém proceder também a uma calibração básica. Para proceder a esta acção, foi feito um quadro que mostra, para diferentes níveis de luminosidade, os valores dos diferentes dispositivos (Tabela 3).

**Tabela 3: Tabela de valores dos dispositivos a diferentes níveis de luminosidade**

Dispositivo	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5	Nível 6
N	1023	750	574	370	301	230
S	1023	710	546	337	270	190
E	1023	930	528	309	200	110
W	1023	960	531	332	220	99

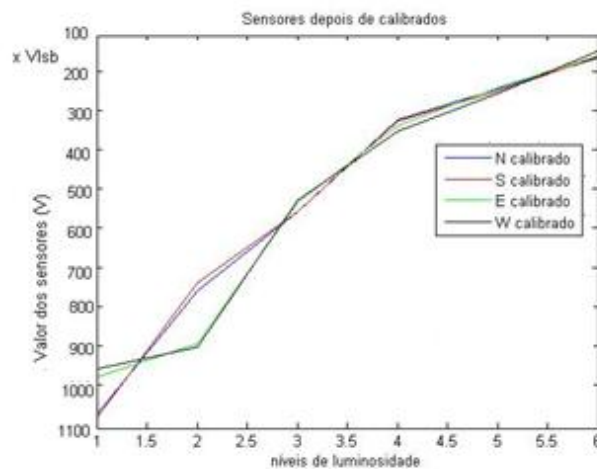
A calibração referida consiste em encontrar a transformação linear que aproxima a resposta da fotoresistência à resposta desejada no sentido dos mínimos quadrados. A resposta desejada consiste na

média entre os valores das fotoresistências para cada eixo, ou seja, para calibrar o dispositivo N, assim como o S, encontrou-se a transformação linear que aproxima a sua resposta à resposta média entre N e S, sendo aplicado o mesmo raciocínio para os dispositivos E e W.



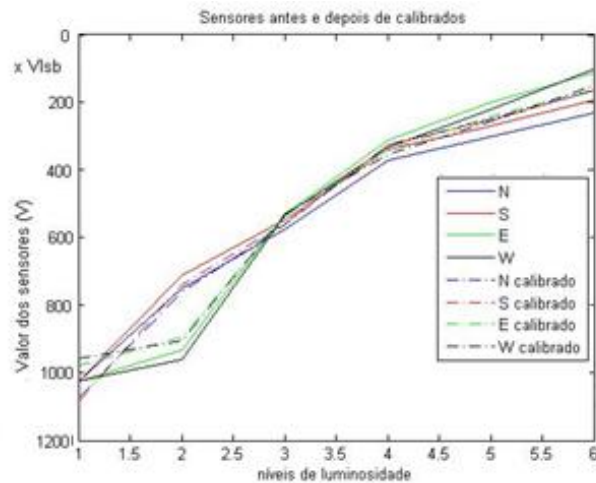
**Figura 3.43: Gráfico dos sensores não calibrados**

Com os valores disponíveis, foi feita a média entre eles para todos os níveis de luminosidade, sendo este o valor que se deseja atingir. Para todos os sensores, foi encontrada a matriz pela qual se deve multiplicar para atingir um valor próximo do esperado, ficando assim os sensores calibrados.



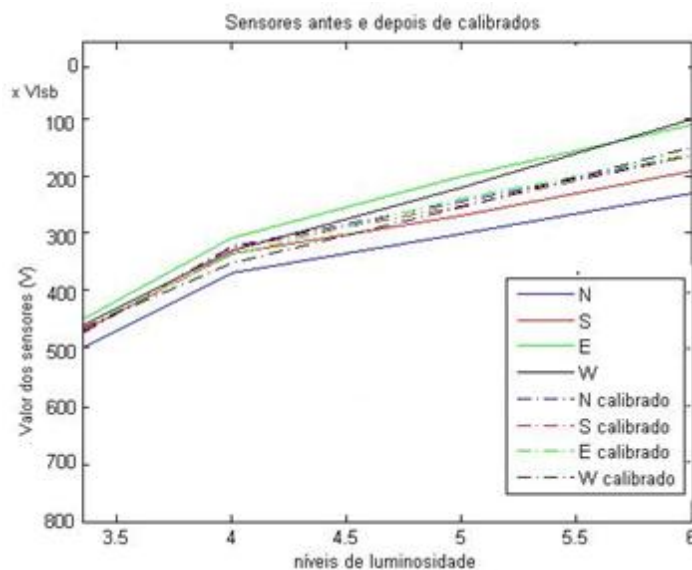
**Figura 3.44: Gráfico dos sensores calibrados**

Para uma boa comparação entre os valores depois e antes de calibrados, atente-se na Figura 3.45 que visa mostrar a diferença dos mesmos, podendo-se concluir que ficam bastante mais próximos quando calibrados.



**Figura 3.45: Sensores antes e depois de calibrados**

Os valores dos sensores, quando calibrados, ficam bastante mais próximos, em particular na zona de maior luminosidade, ou seja, na zona de maior luminosidade, ou seja, quando o valor dos sensores é menor. Para ilustrar esta situação, atente-se na Figura 3.46.



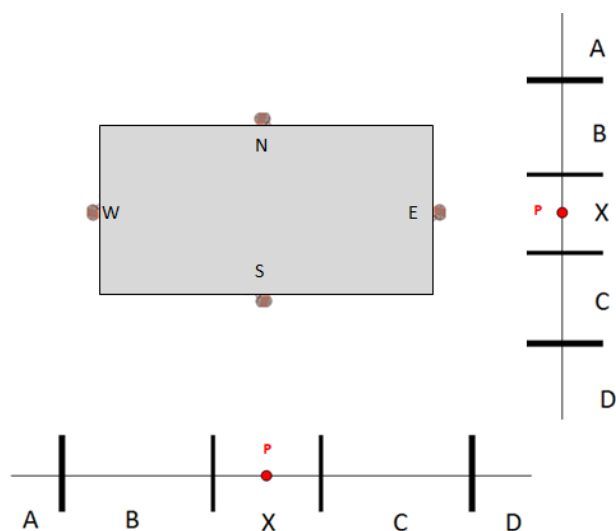
**Figura 3.46: Sensores antes e depois de calibrados na zona de maior luminosidade**

### 3.2.5 Modo de funcionamento

Para o desenvolvimento do software foi adoptado um esquema baseado no nível de diferença de luminosidade das LDR. Defina-se uma variável e chamemos-lhe ponto P. O ponto P representa a diferença de luminosidade entre duas LDR. Como seria de esperar, as duas LDR em questão estão em quadratura, ou seja, o ponto P define a diferença de luminosidade entre a LDR N (Norte) e a LDR S (Sul), mas também a diferença de luminosidade entre a LDR W (Oeste) e a LDR E (Este). Existem,



portanto, dois pontos P. Sendo este um sensor para seguimento solar, o que se espera é que as LDR tenham o mesmo valor de luminosidade, duas a duas. Para simplificar, atente-se na Figura 3.47.



**Figura 3.47: Esquema de precisões**

Na Figura 3.47 encontra-se esquematizado o sensor, bem como a referida recta de precisão tanto no eixo vertical como no eixo horizontal. A figura representa também a situação ideal do sensor, ou seja, o ponto P na zona X. O facto de o ponto P se encontrar na zona X, significa que as LDR N e S ou E e W, dependendo se o movimento em causa for o horizontal ou o vertical, estão iguais, com uma diferença de, no máximo, o número de valores definido para a variável “*precisão máxima*”, por exemplo, quatro valores. Estes quatro valores correspondem a  $(3,3/1024) * 4$ , ou seja, 12,9 mV de diferença no divisor de tensão, o que, neste caso, é considerado zero, logo, considera-se que a luminosidade das LDR é a mesma.

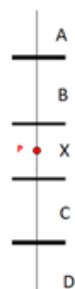
Fora do intervalo X, “*precisão máxima*”, existe o intervalo “*precisão*” que compreende as zonas B e C. Se o ponto P se encontrar neste intervalo, isso significa que a diferença de luminosidade entre as duas LDR é, no máximo, o número de valores definido para a variável “*precisão*”, por exemplo, dez valores, ou seja, 32,2 mV no divisor de tensão.

A diferença entre a zona B e a C depende da LDR que está mais iluminada, ou seja, se o movimento em questão for o horizontal, se o ponto P estiver na zona B significa que a LDR W está mais iluminada que a LDR E, devendo, neste caso, dar ordem ao motor para rodar para Oeste, de modo a que o ponto P esteja na zona X.

A zona A e a zona D são zonas que estão fora dos intervalos de precisão, ou seja, se o ponto P se encontrar numa destas zonas, o programa deve ordenar a actuação imediata dos motores, de modo a que o ponto P esteja na zona X.

De modo a permitir um bom seguimento, este sensor não se baseia apenas em seguir o ponto mais luminoso. Para evitar um constante movimento dos motores, este sensor apenas se move quando a diferença de luz nas LDR ultrapassa um certo limite, ou seja, quando sai da zona “*precisão*”.

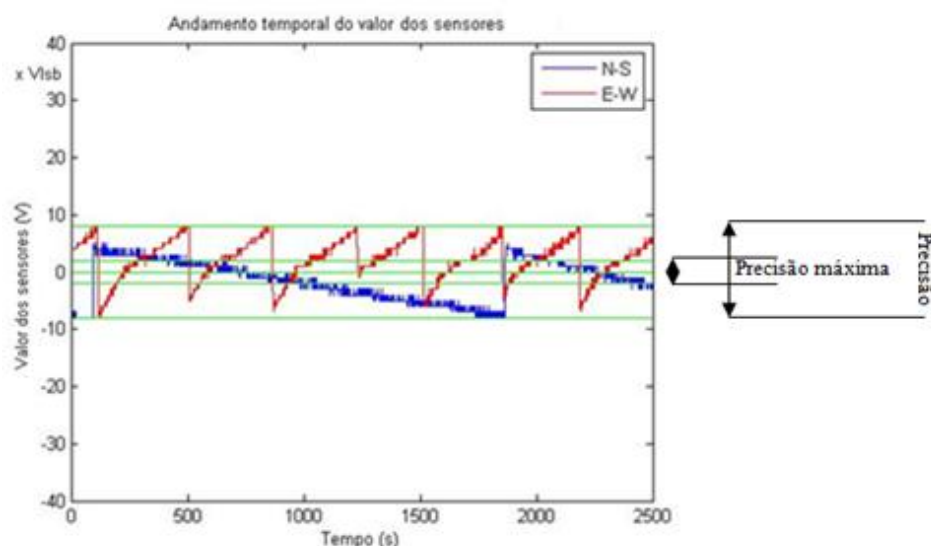
Assim sendo, quando as LDR se encontram com uma diferença de luz considerada substancial, fora da zona “*precisão*”, os motores mover-se-ão no sentido de igualar o nível de luminosidade dos sensores. Os motores apenas pararão quando a diferença de luminosidade se encontrar na zona de precisão máxima X (Figura 3.47), encontrando-se o sensor, desta forma, perfeitamente alinhado. Com o movimento da Terra, o ponto de seguimento deixa de estar na zona de precisão máxima X e passa a estar, por exemplo, na zona de precisão B, o que significa que o sol passou a estar mais a Oeste relativamente à Terra. Neste caso, o sensor nada vai fazer, pois na zona de precisão B, tal como na zona de precisão C, está na zona de precisão, uma zona com uma precisão perfeitamente aceitável. Ao passar para a zona A, o sensor vai enviar a ordem ao motor no sentido de fazer o alinhamento e, desta forma, trazer o ponto de seguimento de volta à zona de precisão máxima X. Para uma melhor percepção, atente-se na Figura 3.48.



	Movimento ↓	Movimento ↑	Amostragem
A	↓	↓	LENTA
B	↓	STOP	RÁPIDA
X	STOP	STOP	LENTA
C	STOP	↑	RÁPIDA
D	↑	↑	LENTA

**Figura 3.48: Esquema da ordem a enviar ao motor**

Quando o sensor se encontra desalinhado, com o ponto P na zona A ou D, os motores vão ser actuados no sentido de colocar o ponto P na zona X. Enquanto o ponto P se encontra na zona A, por exemplo, o motor está a ser actuado e o programa decorre com normalidade. Ao entrar na zona B, a prioridade vai ser parar na zona X, sem que passe para a zona D, logo, o programa faz uma leitura sucessiva das LDR de forma a parar sem sobrelevação, ou seja, a amostragem será rápida (Figura 3.48). Esta leitura sucessiva implica não sair da rotina de leitura até que o ponto P se encontre na zona X, ou seja, até que o sensor esteja perfeitamente alinhado. Se o intervalo “*precisão máxima*” for muito pequeno, o sistema poderá ter um pouco de sobrelevação, no sentido em que o seguidor poderá parar na zona C em vez de parar na zona X, como se pode observar pela Figura 3.49.

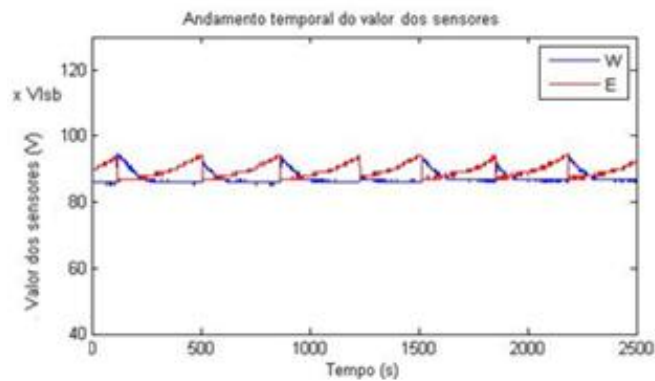


**Figura 3.49: Valor relativo de luminosidade nos dois eixos**

Na Figura 3.49 está representada a luminosidade relativa dos sensores no eixo vertical, a azul, e no eixo horizontal, a vermelho. A luminosidade relativa consiste na diferença do valor de um dispositivo referente ao dispositivo do mesmo eixo, ou seja, se os dispositivos E e W, ou N e S, tiverem o mesmo valor, o valor relativo será zero.

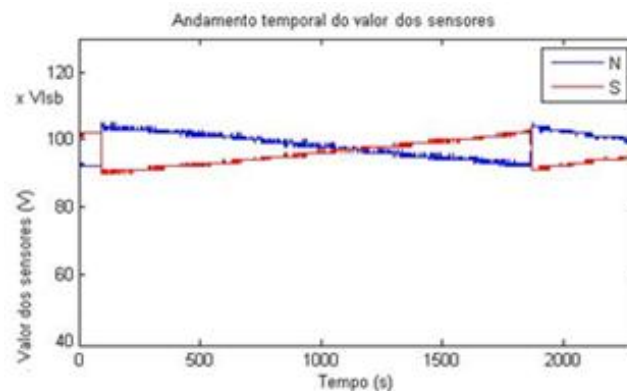
No exemplo ilustrado na Figura 3.49, a estrutura esteve a seguir o sol durante cerca de 40 minutos e foram atribuídos os seguintes valores às variáveis de precisão: *precisão máxima* =  $2 \times V_{lsb}$  V e *precisão* =  $8 \times V_{lsb}$  V. Como é perceptível pela figura, onde estão representados os valores relativos dos dispositivos nos dois eixos, bem como os limites de precisão (a verde), mal os valores relativos saem do intervalo *precisão*, os motores são actuados até que o valor relativo dos dispositivos entre no intervalo *precisão máxima*. Como já foi referido, visto que o intervalo *precisão máxima* é muito pequeno, é frequente acontecer uma ligeira sobrelevação, o que faz com que o valor relativo dos dispositivos passe um pouco o intervalo *precisão máxima*, parando dentro do intervalo *precisão*.

Atente-se, agora, no valor absoluto dos dispositivos. Na Figura 3.50 está ilustrado o andamento temporal do valor de luminosidade dos sensores Este (vermelho) e Oeste (azul). Como seria de esperar, as curvas dos dois sensores têm sempre sentidos distintos, ou seja, se o nível de luminosidade de um sensor está a crescer, o do outro estará, certamente, a diminuir. As curvas afastam-se até que a diferença dos dois sensores atinja o máximo admitido, o valor da variável “*precisão*”, que, no exemplo, é de 8 unidades.



**Figura 3.50: Valores de Este (vermelho) e Oeste (azul)**

Assim como foi feito para os dispositivos do eixo horizontal (E e W), também é visível, na Figura 3.51, o andamento temporal do valor de luminosidade dos sensores Sul (vermelho) e Norte (azul). Bem como no eixo horizontal, também no eixo vertical foi atribuído o valor de 8 à variável precisão.



**Figura 3.51: Valores de Norte (azul) e Sul (vermelho)**

Comparando as duas figuras, Figura 3.50 e Figura 3.51, que ilustram o valor dos dispositivos no mesmo teste, é bem visível que, ao passo que as correcções de trajectória no eixo horizontal são bastante frequentes, cerca de oito vezes, o mesmo não acontece no eixo vertical, que, durante o teste, corrige a trajectória apenas duas vezes. Tal fenómeno deve-se ao facto de, de acordo com as coordenadas utilizadas, o movimento da Terra relativamente ao sol, ser maior no eixo horizontal do que no eixo vertical.

### 3.2.6 Parâmetros do sensor

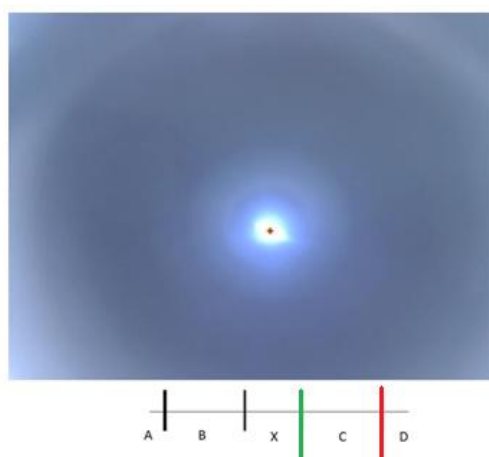
A precisão do sistema deve ter em conta a aplicação em causa. Como já foi referido neste trabalho, um sistema fotovoltaico tem melhor desempenho quando usufrui de seguimento solar (Mousazadeh, Keyhani, Javadi, Mobli, K, & Sharifi, 2009). No entanto não é necessário ter uma precisão de  $0.5^\circ$ , como acontece com os sistemas de concentração solar (Kalougirou, 1996). Os sistemas de seguimento solar, para um melhor rendimento da aplicação, devem mover-se apenas quando há um desvio em

relação ao sol que resulta num decréscimo significativo do rendimento, mas não antes disso, de modo a evitar movimentos supérfluos.

Para um bom funcionamento do sensor, este deve estar “afinado” de modo a fazer a estrutura mover-se quando o grau de precisão deixa de ser admissível, para a aplicação em causa, mas não antes disso. Para tal, basta afectar as variáveis de precisão (“*precisão*” e “*precisão máxima*”) mencionadas anteriormente.

Estas variáveis são definidas por tentativa e erro, de acordo com o nível de precisão que se deseja, podendo mudar a precisão do sistema conforme a aplicação em causa. Pode-se utilizar o sensor desenvolvido, o sensor de precisão, para avaliar o desempenho de seguimento com determinados valores atribuídos às variáveis e, conforme o resultado obtido, aumentar ou diminuir o referido valor.

Imagine-se, por exemplo, uma aplicação que requeira 1° de precisão. Nesse caso, pode-se utilizar a aplicação desenvolvida (Figura 3.10) e detectar quando é que o erro de seguimento é de 1°, num determinado eixo, através de imagens captadas e da informação disponibilizada na própria interface da aplicação. Quando o erro for de 1° no eixo horizontal, por exemplo, através do Termite® consultam-se os valores dos dispositivos E e W. O valor da variável *precisão* será a diferença entre os dispositivos E e W. O valor da variável *precisão máxima* será um valor entre 0 e E-W, dependendo do ângulo com que se deseja que o seguidor passe o sol ao ajustar-se. Para uma melhor percepção, atente-se Figura 3.52.



**Figura 3.52: Ilustração do efeito directo das variáveis de precisão**

Na Figura 3.52 está ilustrada uma imagem captada pelo sensor de precisão, bem como a recta de precisão anteriormente referida. De notar, que a recta de precisão está muito maior do que a proporção devida de forma a uma melhor percepção. Se o sol estiver na zona X, como ilustra a figura, o sistema está bem orientado. Entretanto o sol, aparentemente, vai-se movimentando para Oeste, e o seguidor permanece parado. A certa altura o sol encontra-se quase a passar para a zona D, na recta vermelha. Ora, isto é o ponto a partir do qual o sistema vai alinhar a trajectória. O valor atribuído à variável *precisão* é o que faz mover esta recta, ou seja, se o valor da variável fosse mais pequeno, a recta

vermelha estaria mais para a esquerda, o que faria com que a estrutura se movesse mais cedo. Assumindo agora que o sistema se está a alinhar, ou seja, o sol está, na imagem, a deslocar-se para a esquerda, na zona C e, a certa altura, entra na zona X, passando, portanto, pela recta verde. É aqui que o sistema vai parar. Ou seja, a variável *precisão máxima* faz mover esta recta, ou seja, se o valor atribuído a esta variável fosse menor, a recta estaria mais para a esquerda, fazendo com que a estrutura se movesse mais tempo.

Como já foi referido, se a zona de precisão X for muito pequena, o sistema poderá passar um pouco, chegando à zona de precisão B. No entanto não há problema, pois a precisão admitida termina apenas na zona A que, tal como a zona D, definem o intervalo *precisão*.

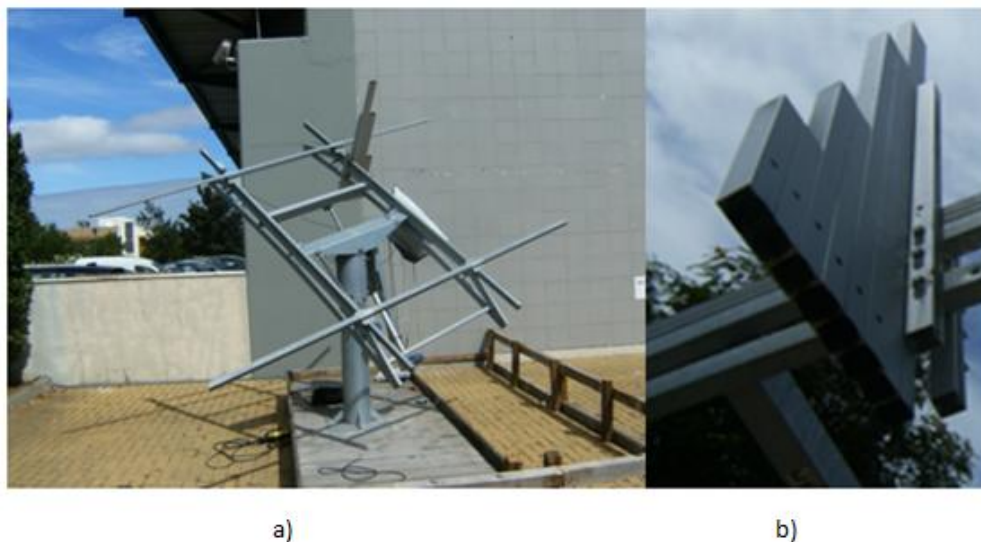
## 4. Resultados

Este é o capítulo reservado aos resultados obtidos. Para tal é feita uma pequena introdução ao sistema de seguimento utilizado, nomeadamente, aos tubos de precisão que, como já foi referido no decorrer do trabalho, são um instrumento muito importante para avaliar o desempenho do sistema.

Neste capítulo são ilustrados e explicados vários testes feitos com o objectivo de analisar o comportamento do sensor de luz desenvolvido para seguimento solar. São ilustrados vários testes em condições atmosféricas distintas, nomeadamente com céu nublado, tentando ilustrar o comportamento do sensor em condições médias; céu limpo, de modo a poder concluir acerca da precisão do sensor em condições muito boas e, por fim, condições atmosféricas difíceis, demonstrando que o sensor, com o céu muito nublado, tem pouca fiabilidade. Ainda neste capítulo é também ilustrado o comportamento do seguidor ao anoitecer, noite e amanhecer, demonstrando que o sensor é capaz de distinguir completamente as três situações, ilustrando o seu exímio comportamento.

### 4.1 Estrutura de seguimento utilizada

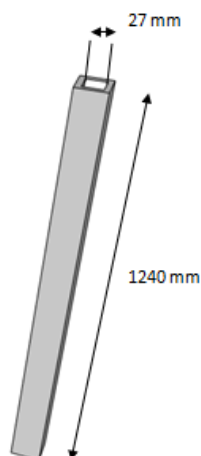
Para a elaboração de testes foi utilizado o seguidor de testes da WS-Energia (Figura 4.1).



**Figura 4.1: a) Imagem do seguidor. b) Tubos de precisão.**

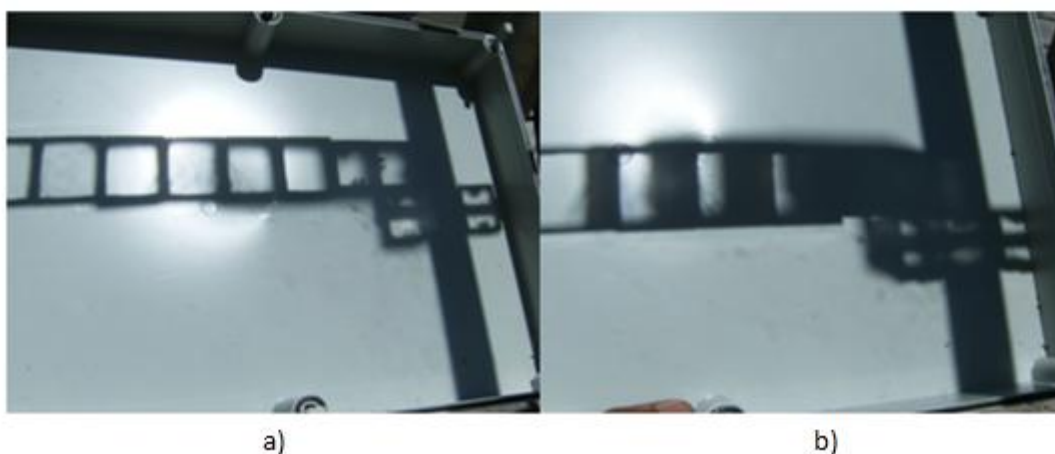
Como se pode observar pela Figura 4.1, a estrutura contém tubos para analisar a precisão com que a mesma está direccionada para o Sol. Ao todo existem oito tubos, de quatro precisões diferentes, indo de 5° a 1°.

O tubo de maiores dimensões, ilustrado na Figura 4.2, tem 1240 mm de altura e 27 mm de lado interior. Fazendo  $P = \arctan\left(\frac{27}{1240}\right)$ , tem-se  $P = 1,25^\circ$ , ou seja, analisando a sombra causada pelo tubo, se passar luz por dentro deste, o seguidor está com um erro de  $1,25^\circ$ .



**Figura 4.2: Ilustração do tubo de maior precisão**

Para analisar a precisão da estrutura basta verificar a sombra causada pelos tubos de precisão, como se mostra na Figura 4.3.



**Figura 4.3: Sombra causada pelos tubos de precisão a)  $1^\circ$  b)  $3^\circ$ .**

Na Figura 4.3 estão demonstradas duas situações. Na Figura 4.3 a), a estrutura está direccionada para o sol com uma precisão de mais de  $1^\circ$ , enquanto que na outra situação demonstrada (Figura 4.3 b) ), a orientação da estrutura conta com uma precisão de apenas  $3^\circ$ .

Para a elaboração dos testes foi utilizado o sensor de precisão, constituído por uma webcam e descrito no Capítulo 3.1. A utilização deste sensor tem um papel muito importante nestes testes, pois quantifica o erro, em graus, de uma forma automática, com uma taxa de amostragem de  $N$  segundos, sendo  $N$



escolhido pelo utilizador. Para uma boa utilização deste sensor, como atrás referido, foi necessário calibrá-lo. Para calibrar o sensor foi necessário orientar manualmente o seguidor até este ficar perfeitamente alinhado e correr o programa Matlab® de modo a encontrar o centro do sol. Visto que a estrutura foi perfeitamente alinhada, a estrutura estará perfeitamente alinhada com o sol, logo, o centro do sol, encontrado pelo sensor de precisão, é para onde a estrutura está direccionada. A partir deste momento, o ponto de referência deixa de ser o centro da imagem, como seria idealmente, para ser o ponto encontrado experimentalmente. Na Figura 4.4 está ilustrado o seguidor completamente alinhado com o sol.



**Figura 4.4: Sensor da webcam calibrado manualmente: a) visto no sensor de precisão b) visto nos tubos de precisão**

Como se pode observar pela Figura 4.4 b), a estrutura foi perfeitamente alinhada. Nesse instante foi corrida a aplicação Matlab®, encontrando o centro do sol (Figura 4.4 a) ). Após este procedimento, o sensor encontra-se calibrado. De notar que o centro do sol não está no centro da imagem, o que prova que, de facto, é conveniente calibrar o sensor, pois, caso se admitisse que o sensor estava perfeitamente alinhado, estar-se-ia a cometer um erro logo à partida.

## 4.2 Céu nublado

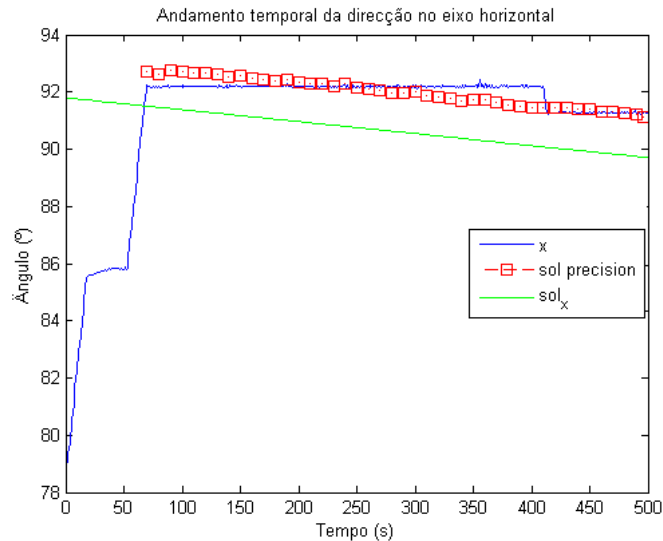
Num dia de céu nublado, como ilustra a Figura 4.5, foi elaborado um teste de, sensivelmente 10 minutos para comparar o seguimento com sensor de luz com o seguimento astronómico. O teste consiste em deixar o seguidor a trabalhar normalmente a partir de uma posição aleatória, sendo esperado que este, em primeiro lugar, se alinhe com a trajectória do sol e, então, a possa seguir. Neste teste foi utilizado também o sensor baseado na webcam com o fim de encontrar a trajectória real do sol durante o teste. Este sensor, no teste em questão, tem um tempo de amostragem de 10 segundos.



**Figura 4.5: Fotografia do céu**

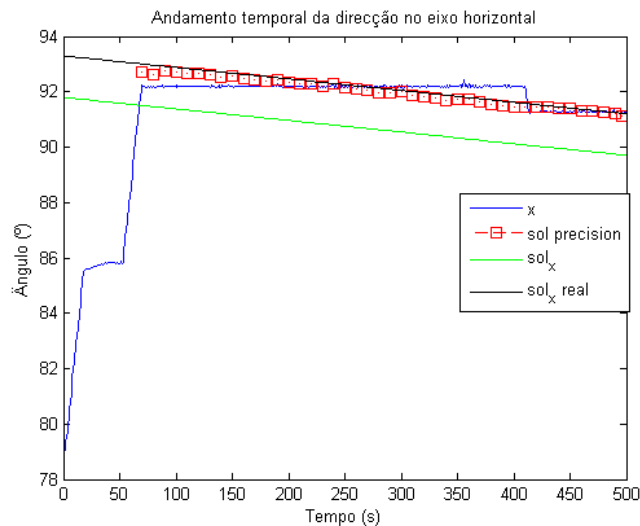
Este teste, cujo âmbito é mostrar o funcionamento geral, vai permitir verificar o alinhamento do seguidor, a partir de uma posição aleatória, bem como quantificar o erro do seguimento astronómico em cada um dos eixos. Atente-se primeiramente no eixo horizontal e em seguida no vertical.

Na Figura 4.6 estão ilustradas três curvas. A azul está ilustrada a trajectória seguida pela estrutura de seguimento, a verde está a trajectória do sol, obtida por meio de cálculos do seguimento astronómico e, finalmente, a vermelho está a trajectória real do sol obtida pelo sensor de precisão desenvolvido. Com este modo de ilustrar o seguimento, quando a trajectória real do sol (a vermelho) coincide com a trajectória da estrutura (a azul), significa que o erro de seguimento é de  $0^\circ$ , ou seja, a estrutura encontra-se perfeitamente alinhada com o sol.



**Figura 4.6: Andamento temporal no eixo horizontal**

Como se pode observar pela Figura 4.6, a trajectória do sol, dada pelo seguimento astronómico, não coincide com a trajectória real do sol. Esta pode ser obtida unindo os pontos em que a curva da trajectória da estrutura coincide com a trajectória real do sol dada pelo sensor de precisão, ou seja, unindo os pontos em que o sensor de precisão detecta um erro de seguimento de  $0^\circ$ . Desta forma, a trajectória real do sol é representada a preto na Figura 4.7. Outro aspecto que é perceptível pela figura é o facto de haver uns instantes, por volta dos quarenta segundos, em que a estrutura permanece imóvel. Tal facto deve-se ao modo de funcionamento dos motores, pois estes não funcionam em simultâneo, sendo um minuto dividido em trinta segundos para o movimento horizontal e trinta segundos para o movimento vertical.

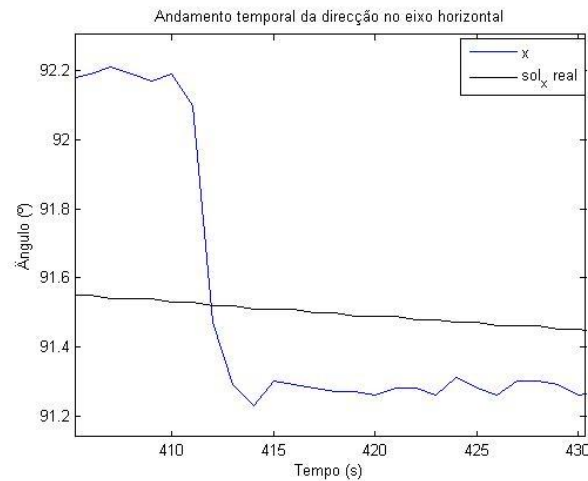


**Figura 4.7: Andamento temporal no eixo horizontal com a trajectória real do sol**

De notar que a posição real do sol, a preto, não passa em todos os pontos dados pelo sensor de precisão (a vermelho). Tal pode ser explicado pelo facto de a recta ser uma recta aproximada e que a

prioridade não é passar em todos os pontos mas sim, passar onde os pontos a vermelho (dados pelo sensor de precisão) coincidem com a rota real da estrutura (a azul), pois esses são os pontos onde, garantidamente, o erro é nulo. Os restantes pontos, apesar de serem próximos do real, podem ter influência quer de erros de conversão de pixéis para graus, quer do facto de o sensor de precisão não estar perfeitamente alinhado com a estrutura.

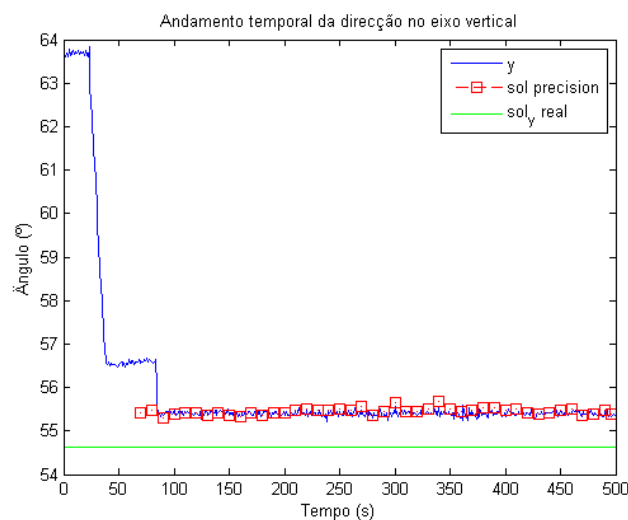
Para uma melhor percepção da precisão do sensor, atente-se na Figura 4.8, na qual é visto em pormenor o ajuste de posição feito pela estrutura.



**Figura 4.8: Pormenor do ajuste de posição**

Como é visível na Figura 4.8, a estrutura, ao estar desfasada do sol em cerca de  $0,6^\circ$ , faz um ajuste de posição, ficando com cerca de  $0,4^\circ$  de desfasagem, desta vez mais para Oeste em comparação com a posição do sol. De notar que este teste foi feito com o objectivo de mostrar o funcionamento do sensor e não de ter uma grande precisão.

De uma forma idêntica, veja-se o que se passa no eixo vertical. Para tal, observe-se a Figura 4.9.

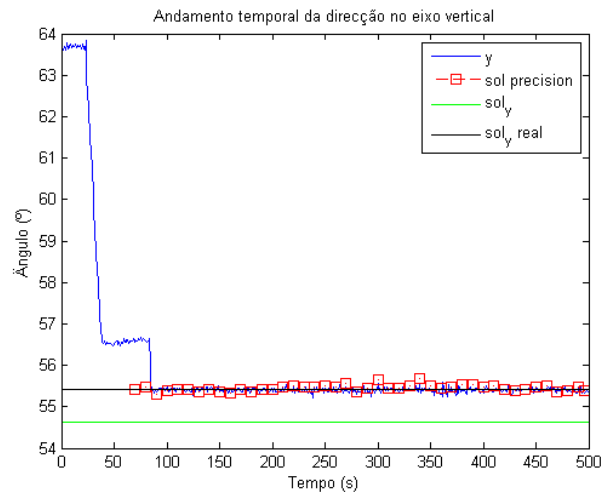


**Figura 4.9: Andamento temporal no eixo vertical**

Ao observar a Figura 4.9 pode-se observar que o erro dado pelo sensor de precisão, quando comparado com o que se passa no eixo horizontal, é muito pequeno. Tal fenómeno deve-se ao facto de, referente à posição da estrutura na Terra, o sol se movimentar muito mais no eixo horizontal do que no vertical.

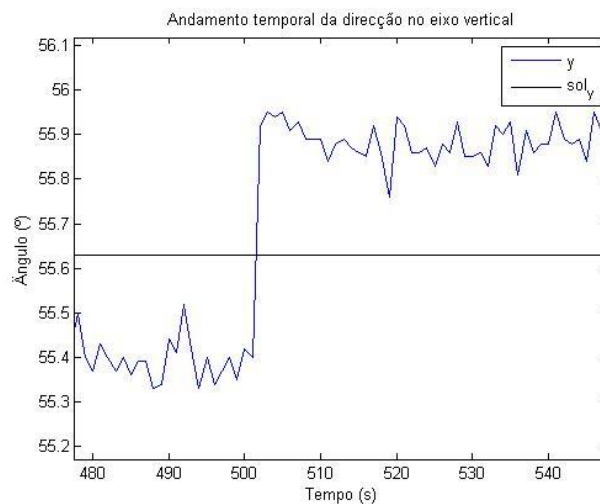
À semelhança do que o que foi feito anteriormente, para encontrar a trajectória real do sol, desta vez no eixo vertical, basta unir os pontos onde a trajectória solar dada pelo sensor de precisão coincide com a curva da estrutura, significando isto que o erro de seguimento é nulo.

Na Figura 4.10 é já visível, a preto, a trajectória real do sol no eixo vertical.



**Figura 4.10: Andamento temporal no eixo horizontal com a trajectória real do sol**

Para uma melhor percepção do comportamento do sensor, atente-se na Figura 4.11 onde é visível o ajuste de posição.



**Figura 4.11: Pormenor do ajuste de posição no eixo vertical**

Como se pode observar, a estrutura está com um erro de  $0,2^\circ$  abaixo do sol e passa para um erro de  $0,3^\circ$  para cima indo este erro diminuir ao longo do tempo até se repetir, sensivelmente, a mesma situação.

Com este teste foi possível ilustrar o bom funcionamento do sensor de luz. Como é bem visível nos gráficos anteriores, a estrutura, que, de início, não está orientada para o sol, move-se suavemente no sentido de se alinhar e, a partir desse ponto segue a trajectória do sol com uma precisão de, no pior caso,  $0,6^\circ$ .

Outro aspecto muito interessante que foi possível determinar com este teste foi o erro proveniente da utilização de seguimento astronómico. Com este tipo de seguimento, o erro de estimativa da trajectória do sol é de, sensivelmente  $1^\circ$  no eixo horizontal e de  $1^\circ$  também no eixo vertical.

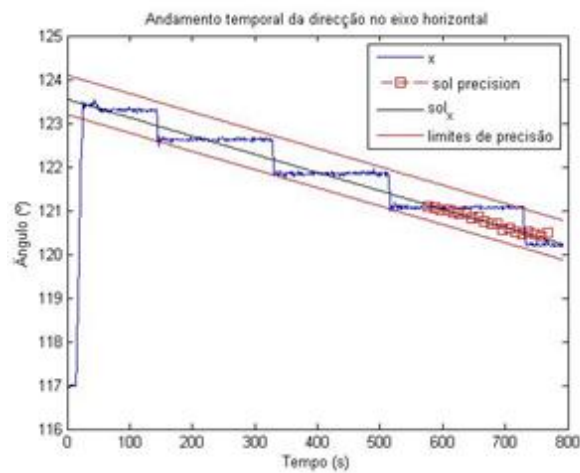
### 4.3 Céu limpo



**Figura 4.12:** Fotografia do céu no momento do teste

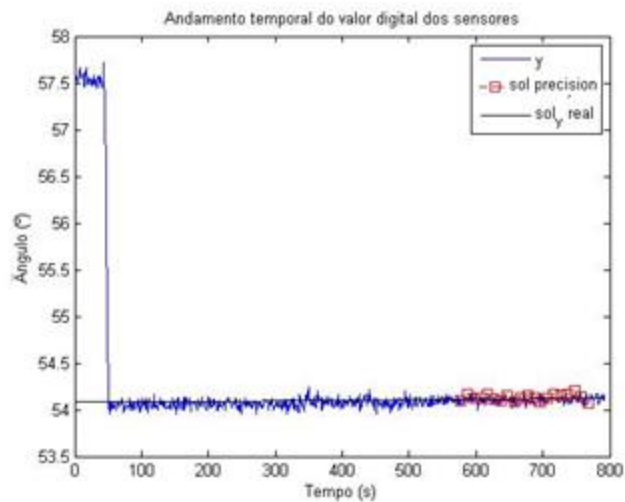
Com o céu limpo, como se pode observar pela Figura 4.12, é uma boa altura de fazer um teste de precisão. Para tal, o seguidor, a partir de uma posição aleatória, de modo a avaliar também o seu comportamento a alinhar-se com o sol, foi deixado a seguir.

Na Figura 4.13, onde está representado o andamento no eixo horizontal, é possível observar que, mal inicia o teste, o seguidor move-se no sentido de se alinhar com o sol, conseguindo-o. A partir desse momento o seguimento é feito com uma precisão de, sensivelmente  $0,4^\circ$  a Este e  $0,3^\circ$  a Oeste. Como é visível na Figura 4.13, estão traçadas duas rectas, de  $0,9^\circ$  de diferença, que visam traçar a zona de acção do sensor, ou seja, o sensor tem uma acção máxima de  $0,9^\circ$  em torno do sol.



**Figura 4.13: Andamento temporal no eixo horizontal**

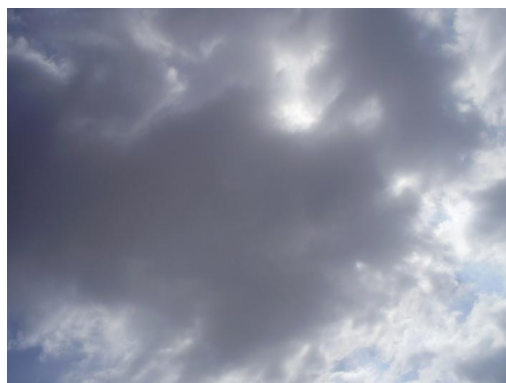
O andamento temporal no eixo vertical está representado na Figura 4.14 onde, como se pode observar, o seguidor vai directamente de encontro à posição do sol, seguindo-o a partir desse ponto.



**Figura 4.14: Andamento temporal no eixo vertical**

## 4.4 Condições adversas

### 4.4.1 Céu muito nublado



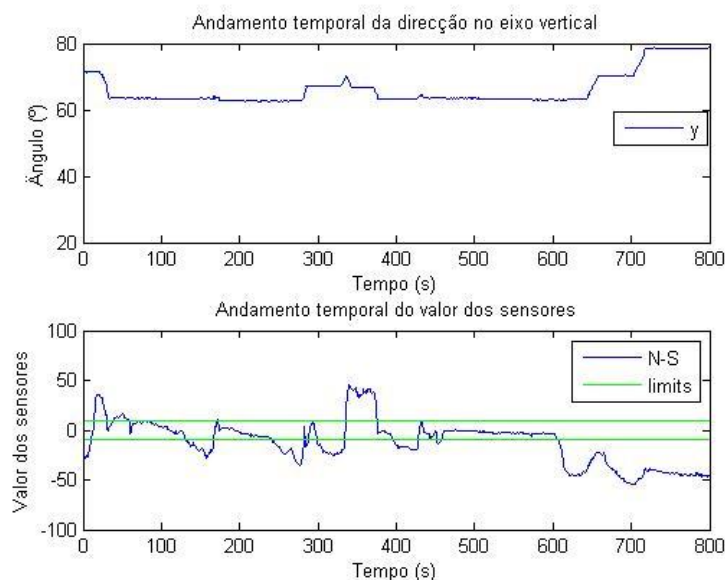
**Figura 4.15: Fotografia do céu no momento do teste**

Num dia de céu muito nublado, como ilustra a Figura 4.15, foi elaborado um pequeno teste de, sensivelmente 15 minutos para analisar o comportamento do sensor. O teste consiste simplesmente em deixar o seguidor a trabalhar normalmente a partir de uma posição aleatória.

No decorrer do teste foi observado que o seguidor, aquando um aparecimento do sol entre as nuvens, se movimentava no sentido de se alinhar correctamente. No entanto, o aparecimento de nuvens era inevitável e, quando o sol era tapado, o seguidor movimentava-se num sentido aparentemente aleatório. Tal facto é explicado pelo facto de as fotoresistências serem sensíveis também à radiação indirecta, o que faz com que o sensor se queira movimentar no sentido da maior radiação sentida.

Para ilustrar esta situação, optou-se por ilustrar a diferença de luminosidade entre os dispositivos nos dois eixos e a trajectória do seguidor nesse eixo. Começando pelo eixo vertical, atente-se na Figura 4.16.

Na Figura 4.16 é ilustrado o valor relativo de luminosidade dos sensores N e S, bem como o intervalo *precisão* utilizado neste exemplo (a verde). Como se pode observar pelas duas figuras, que devem ser consultadas em simultâneo, quando o valor relativo de luminosidade sai do intervalo admissível, o seguidor ajusta a trajectória. Ora, esta conclusão tinha sido já tirada quando se descreveu o funcionamento do sensor. No entanto, neste exemplo, há que reparar que o valor relativo de luminosidade sai várias vezes do limite admissível e em ambos os sentidos. Este é o efeito das nuvens.

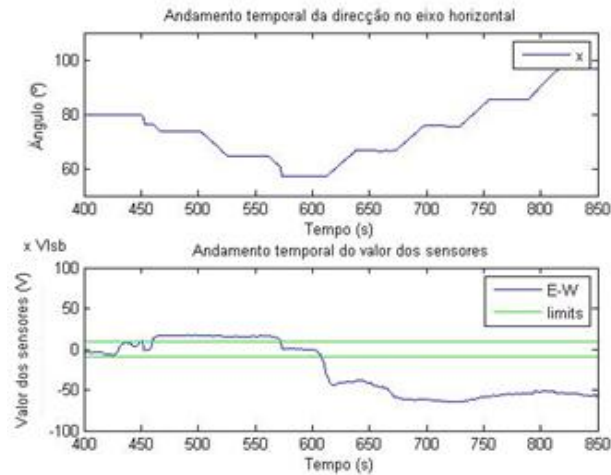


**Figura 4.16: Efeito das nuvens no eixo vertical**

Ao observar a Figura 4.16, é visível que a estrutura se movimenta em ambos os sentidos e, obviamente, esta não é a trajectória do sol. Este fenómeno é consequência do facto de as fotoresistências serem sensíveis também a radiação indirecta.



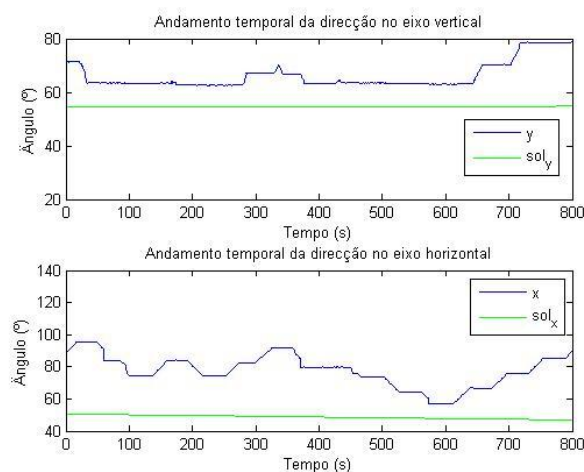
Tal como no eixo vertical, também no eixo horizontal acontece este fenómeno, como pode ser observado na Figura 4.17.



**Figura 4.17: Efeito das nuvens no eixo horizontal**

Como se pode observar pela Figura 4.17, o seguidor movimenta-se quando a diferença entre os sensores E e W é maior do que o admissível. Ao observar o movimento do seguidor, é visível que, mesmo quando o valor relativo dos sensores está fora dos limites, este permanece parado por uns momentos. Este fenómeno deve-se ao facto de, como já foi referido, um minuto estar repartido em movimento horizontal e movimento vertical, logo, há sempre trinta segundos em que o seguidor, num eixo está parado.

Outro aspecto de grande importância neste caso é determinar qual a trajectória do sol durante este teste. Ora, devido ao facto de o sol estar poucas vezes visível durante o teste, a utilização do sensor de precisão revelou-se pouco viável. Contudo atente-se na Figura 4.18 onde é visível a trajectória descrita pelo seguidor, em ambos os eixos, tal como a trajectória do sol, calculada pela aproximação astronómica.



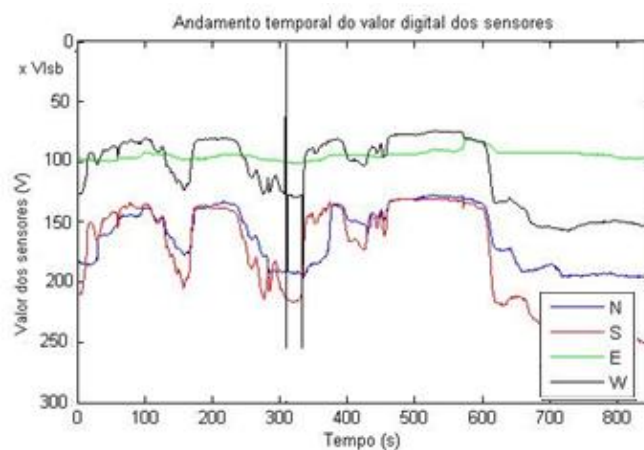
**Figura 4.18: Comparação com o movimento efectuado e a trajectória do sol**

Como se pode observar pela Figura 4.18, o movimento efectuado não se aproxima, de forma alguma, ao movimento do sol. O seguidor, neste teste, está em constante movimento e longe de encontrar a posição do sol. A trajectória do sol ilustrada na figura é a trajectória dada pelo sistema de seguimento astronómico pois, o sensor de precisão não conseguiu encontrar o sol mas, como já foi visto, a diferença entre a posição de referência do sol (dada pela aproximação astronómica) e a posição real (dada pelo sensor de precisão) não andarão longe de um ou dois graus.

Pode-se então concluir que, com o céu muito nublado, é preferível que o seguidor esteja parado.

#### 4.4.1.1 Robustez às nuvens

Para definir um valor para céu muito nublado atente-se nas leituras efectuadas durante o teste, visível na Figura 4.19.



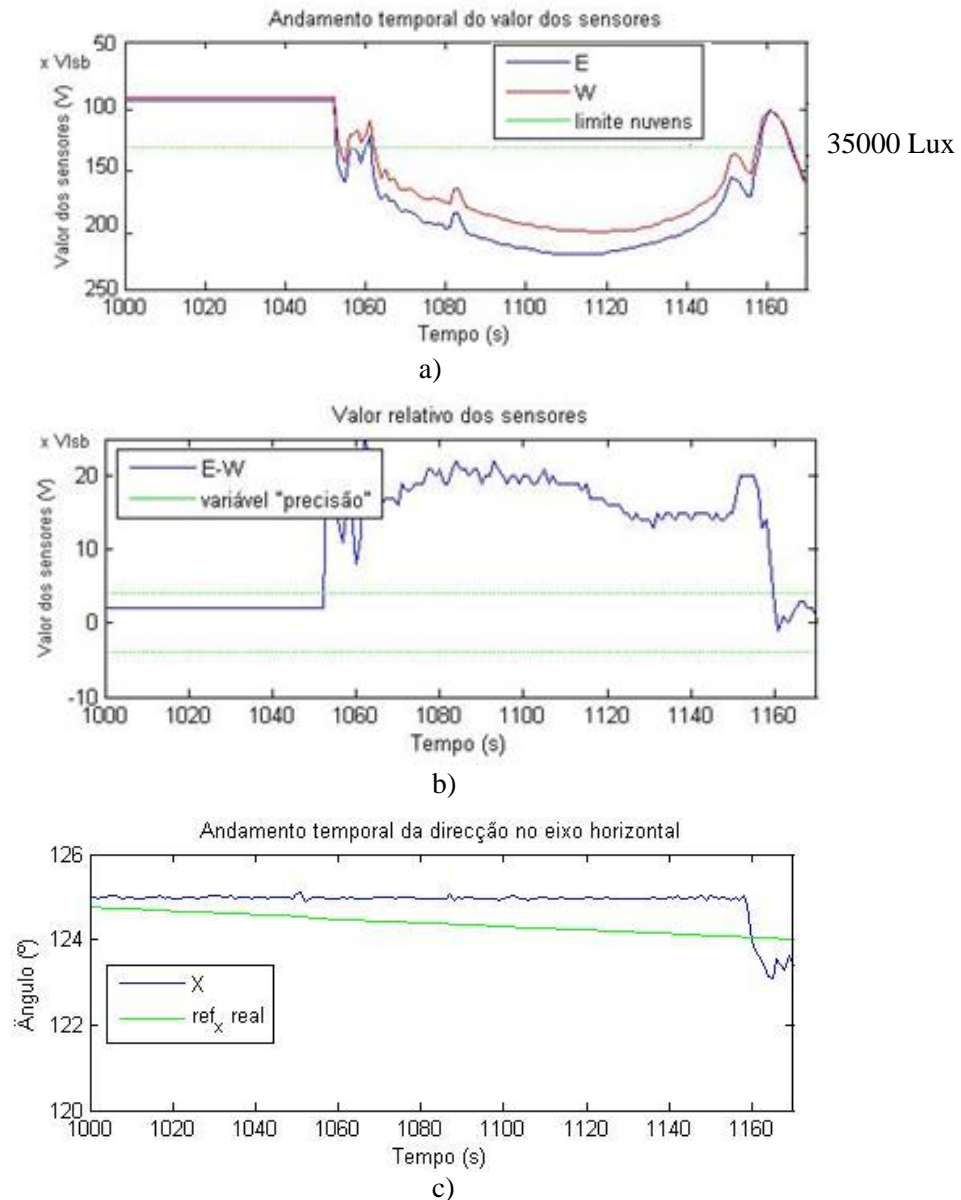
**Figura 4.19: Valor dos sensores**

Uma forma de proteger esta situação e de evitar que a estrutura esteja sempre em movimento à procura do sol é definir um limite a partir do qual o sensor vai perceber que o céu está muito nublado. A estrutura só se movimentará se E ou W for menor que  $130 \times V_{lsb}$  V ou se N ou S for menor que  $200 \times V_{lsb}$  V.

Com a protecção referida, ou seja, fazer a estrutura mover-se apenas se o nível de luminosidade for alto, com o intuito de a fazer mover apenas aquando da incidência de radiação directa, o sistema mostrou uma resposta bastante satisfatória, não sendo, no entanto, perfeita.

Na Figura 4.20 são demonstrados três gráficos que devem ser analisados simultaneamente. No primeiro gráfico é mostrado o valor dos sensores referentes ao eixo horizontal, ou seja, o E e W. Para uma boa percepção do que se passa, é muito importante saber o valor relativo dos sensores, valor mostrado no segundo gráfico (Figura 4.20 b). A par destes gráficos ilustrativos do valor dos sensores,

encontra-se também ilustrado o movimento efectuado pelo seguidor, bem como a trajectória real do sol (Figura 4.20 c) ).



**Figura 4.20: Robustez às nuvens**

De notar que, até ao segundo 1050, os sensores são relativamente iguais, ou seja, não há necessidade de corrigir a trajectória. A partir desse momento, o sistema passa a estar sob forte influência de nuvens, no entanto, são nuvens muito densas que fazem ultrapassar o limite da radiação directa, o que faz com que o sistema permaneça imóvel. O sistema corrige a trajectória no segundo 1160 que, como é visível pelo gráfico do valor relativo dos sensores, estes têm uma diferença entre si maior do que o considerado na variável “precisão”, de quatro, neste caso. Juntando a este aspecto o facto de o sensor mais iluminado ter um valor menor que o limite de nebulosidade,  $130 \times V_{lsb}$  V, faz com que a estrutura corrija a trajectória.

#### 4.4.2 Comportamento ao anoitecer



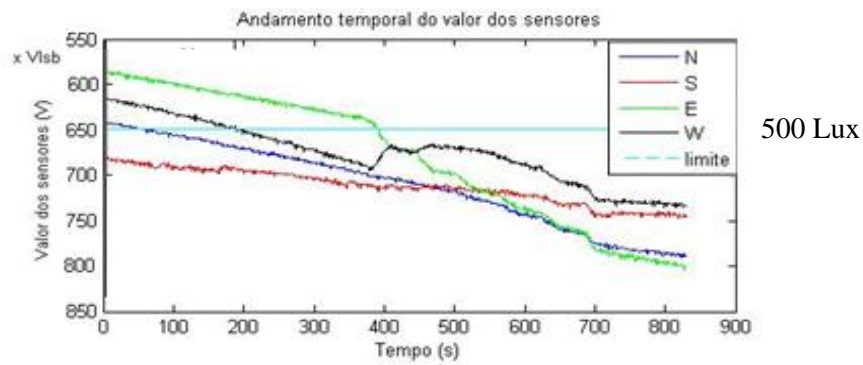
**Figura 4.21: Fotografia do céu na noite do teste**

Este teste consiste em mostrar o comportamento do sensor ao anoitecer. Nesta altura do dia, a estrutura estará voltada para a última posição onde o sol foi sentido, logo, estará voltada para Oeste. O sensor deverá detectar que a noite se aproxima, através do baixo valor de luminosidade das fotoreistências, e movimentar-se para Este de modo a ficar já minimamente orientado para o sol, quando este nascer.

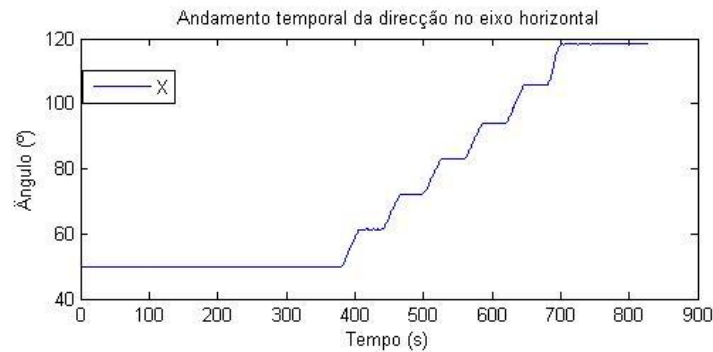
Foi efectuado um teste de modo a estudar o efeito do anoitecer nos diferentes dispositivos. Chegou-se à conclusão de que pode ser considerado noite quando os dispositivos acusam um valor de  $650 \times V_{lsb}$  V.

Definiu-se, portanto, que a partir do valor  $650 \times V_{lsb}$  V, pode ser considerado noite, logo, mal as quatro fotoreistências acusarem um valor superior a  $650 \times V_{lsb}$  V, ou seja, menos luminoso, a estrutura deverá voltar-se para Este. A estrutura move-se para Este durante seis minutos, valor aceitável para atingir, sensivelmente, a posição desejada.

A Figura 4.22, que consiste em dois gráficos que devem ser interpretados em simultâneo, retrata esta situação. Pelo gráfico de cima pode-se observar o valor de cada um dos sensores, enquanto que, no de baixo, pode ser visível o movimento do seguidor no eixo horizontal. De notar que o valor dos dispositivos está a aumentar suavemente, efeito directo do facto do dia estar a perder luminosidade, e que, quando o dispositivo mais luminoso, neste caso, o Este, passa o valor correspondente à noite,  $650 \times V_{lsb}$  V, a estrutura inicia o seu movimento para Este. De notar também que, enquanto a estrutura se movimenta para Este, os valores dos dispositivos vão trocando de posição, dois a dois, ou seja, o dispositivo N inicia mais luminoso do que o S mas a situação vai-se invertendo. O mesmo acontece com os dispositivos E e W.



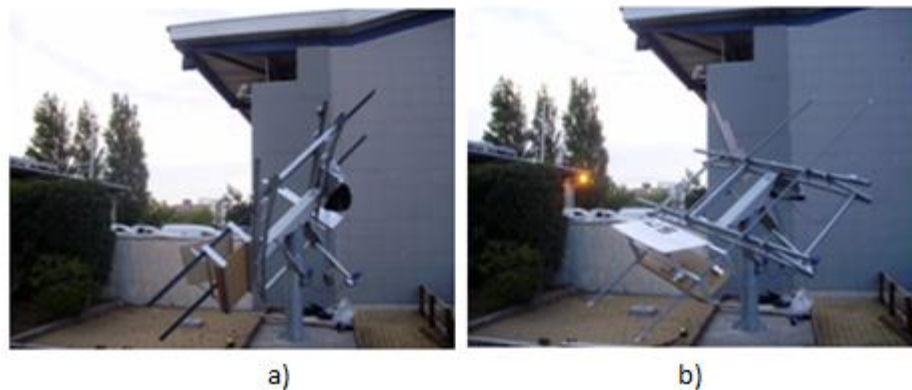
a)



b)

**Figura 4.22: a) valor dos sensores e b) movimento horizontal**

Na Figura 4.23 são visíveis as duas posições. Na Figura 4.23 a) a estrutura está na posição até onde conseguiu seguir o sol e na Figura 4.23 b) encontra-se já virada para Este esperando o amanhecer.



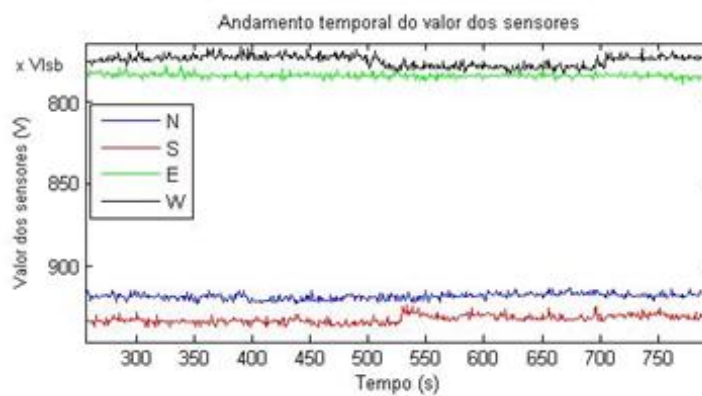
**Figura 4.23: Variação da posição da estrutura ao anoitecer**

Chegada a noite foi testada a robustez a possíveis interferências externas tais como carros a passar com os máximos ligados, luzes de presença na vizinhança do seguidor, como acontece realmente na estrutura de teste e pode ser visível na Figura 4.24, e muitos mais factores que podem induzir o sensor a erro. Como se pode observar pela Figura 4.25, figura que ilustra o valor dos sensores durante a noite, as influências externas não são perceptíveis à primeira vista. No entanto, é possível notar que, entre o segundo 500 e 700, o valor do sensor W decresce um pouco, ou seja, fica mais iluminado. Tal facto deve-se à influência dos máximos de um carro. Tal influência mostra-se muito ténue, talvez também

devido ao facto de o sensor se encontrar numa posição alta. Como observado, nem tão pouco a luz de presença do local tem influência no funcionamento do sensor, uma vez que o valor acusado, pelos dispositivos, por estas luzes não é minimamente confundível com a luz do sol.



**Figura 4.24: Luzes de presença no local**



**Figura 4.25: Sensor sob influência de luzes externas**

Todo este teste visa mostrar o funcionamento do sensor quando cai a noite. Os resultados obtidos são bastante satisfatórios uma vez que, ao anoitecer, a estrutura de seguimento, virada a Oeste devido a um dia de seguimento, ao detectar que é noite, vira-se para Este para ficar já minimamente orientada a nascente. Esta posição foi escolhida de modo a que, aquando do nascimento do sol, este seja mais facilmente detectável pelo sensor. Também neste teste foi possível ver que o sensor pode detectar outras luzes externas ao seu funcionamento não interferindo, no entanto, com o seu desempenho pois os valores sentidos pelo sensor são valores de muito menor luminosidade que o sol, não sendo, por isso, confundível.



#### 4.4.3 Comportamento ao amanhecer



Figura 4.26: Fotografia do seguidor ao amanhecer

Ao amanhecer, o seguidor vai estar já minimamente virado para Este, como foi visto no capítulo anterior, referente ao anoitecer. A estrutura de seguimento ficará nesta posição até que haja um certo nível de luminosidade, o mesmo definido para a robustez às nuvens, ou seja, o valor  $130 \times V_{lsb}$  V para E e W e o valor de  $200 \times V_{lsb}$  V para N e S (capítulo 4.4.1.1). O sol, ao nascer, vai trazer iluminação e, quando o valor dessa iluminação passar o limite definido, a estrutura começará a fazer o seguimento. A Figura 4.26 visa mostrar a situação em que o seguidor detecta a presença do sol e gira para Este no sentido de se alinhar. No entanto, a estrutura tem limites de acção, não sendo possível orientar-se perfeitamente com o sol. Para se perceber melhor esta situação, atente-se na Figura 4.27.

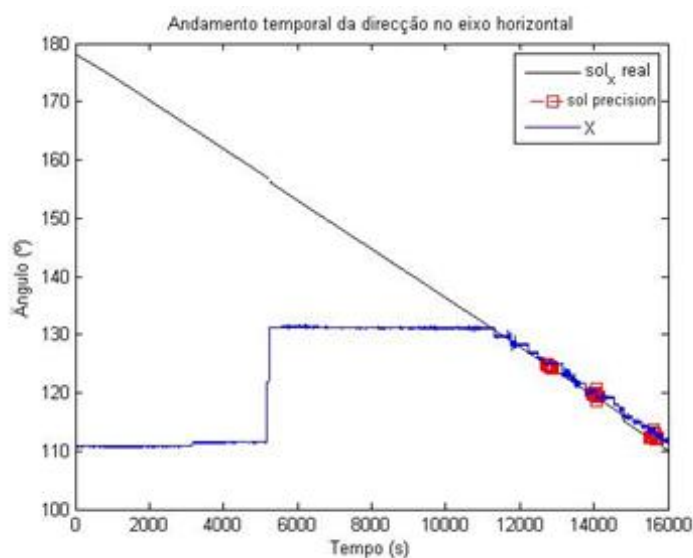
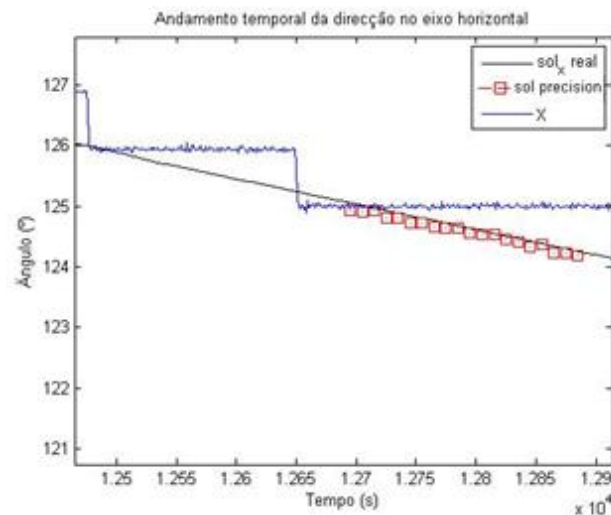


Figura 4.27: Andamento temporal no eixo horizontal

Na Figura 4.27 é bem visível que o limite da estrutura é de  $130^\circ$ , visto que a estrutura se tenta alinhar com a trajectória do sol parando no valor  $130 \times V_{lsb}$  V. A partir desse momento, espera que o sol se

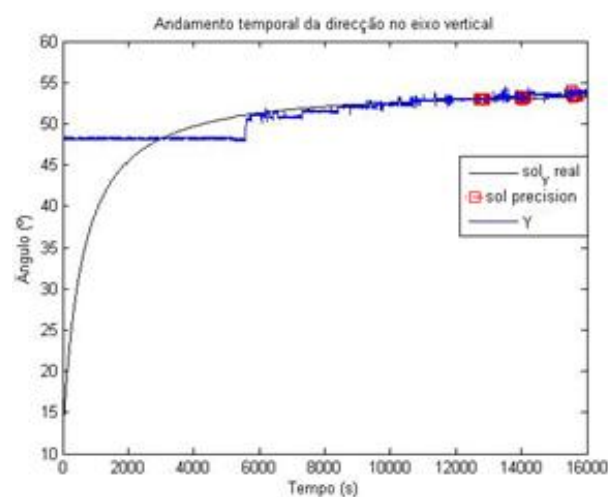
aproxime da sua zona de acção para, então, poder fazer o seguimento, o que acaba por acontecer por volta do segundo 11000. Na figura é também visível, a vermelho, o erro detectado pelo sensor de precisão, o que permitiu que fosse traçada uma recta representando, aproximadamente, a trajectória realmente efectuada pelo sol. O erro dado pelo sensor de precisão, bem como a trajectória real do sol e o próprio movimento da figura pode ser visto em pormenor na Figura 4.28.



**Figura 4.28: Pormenor do erro dado pelo sensor de precisão**

De notar que a variável “precisão”, neste caso, é larga, pois os ajustes feitos são espaçados, permitindo um erro de, sensivelmente, 1°.

No que diz respeito ao eixo vertical, passa-se relativamente o mesmo, ou seja, a partir, sensivelmente, do segundo 5000, começa o seguimento, pois o nível de luminosidade é aceitável. Neste caso, o sol nasce já dentro dos limites do seguidor, ou seja, este começa de imediato a seguir o sol.

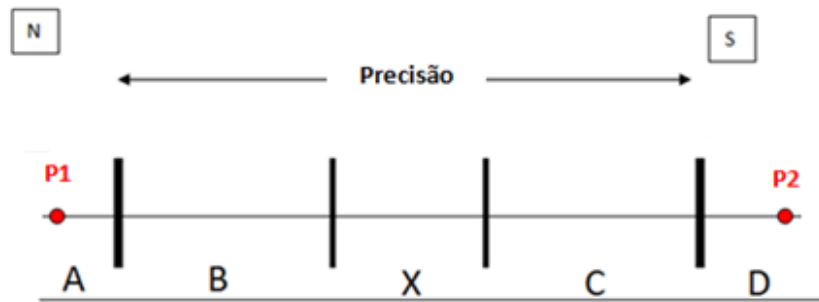


**Figura 4.29: Andamento temporal no eixo vertical**



No caso do movimento vertical, a variável “precisão” escolhida foi demasiado pequena, o que faz com que haja, por um lado, ajustes de posição muito frequentes e, por outro, oscilações da estrutura, como se pode observar pela Figura 4.29.

O facto de haver ajustes de posição muito frequentes é fácil de perceber, pois, se o intervalo admitido é pequeno, basta que a diferença dos sensores seja um pouco diferente para querer ajustar a posição. Já o facto de haver oscilações tem a ver com a recta de precisão, apresentada anteriormente, que se reproduz na Figura 4.30.



**Figura 4.30: Recta de precisão**

Imagine-se que a variável “Precisão” foi definida como sendo de apenas dois valores. Se, num determinado momento do dia, o sensor N está mais iluminado que S, o valor de N será menor que o valor de S. Imagine-se, então, que N é menor que S em três unidades. Esta situação corresponde à zona A, ilustrada na Figura 4.30 pelo ponto P1. Se o ponto está na zona A, o seguidor vai mover-se no sentido de pôr o ponto na zona X. No entanto, mal o seguidor se move, o sensor S fica mais iluminado, em quatro valores, correspondendo então à zona D ilustrada na figura pelo ponto P2, o que faz com que o sistema se tente alinhar com X.

Esta situação acontece quando o intervalo “precisão” é demasiado pequeno e tem como consequência um constante movimento do seguidor, como se pode observar pela Figura 4.29, o que é desaconselhável.

Por outro lado, ao definir um intervalo “precisão” demasiado largo, a resposta é “limpa”, no sentido em que não há oscilações na trajectória mas o seguimento é feito com menos precisão do que se conseguiria obter com um intervalo bem definido.



## **5. Conclusões**

O capítulo em causa resume as conclusões que podem ser tiradas desta tese. Está dividido em três partes, sendo a primeira a síntese, onde é feito um pequeno resumo do trabalho efectuado. A segunda parte deste capítulo consiste nas conclusões que podem ser tiradas a partir dos resultados observados e, finalmente, o último subcapítulo é reservado ao trabalho futuro que pode ser feito.

### **5.1 Síntese**

No decorrer deste trabalho foi desenvolvido um conjunto de sensores de luz para seguimento solar.

Um dos sensores, chamado sensor de precisão, como o próprio nome indica, é um sensor bastante preciso ( $0,07^\circ$ ), que tem como função avaliar o desempenho da estrutura de seguimento, quer o modo de seguimento seja astronómico, quer seja por sensor de luz. Este sensor, para além de extremamente preciso, tem muito poucas fontes de erro, uma vez que é possível calibrá-lo cada vez que é acoplado à estrutura. Para uma maior facilidade em utilizar este sensor, foi desenvolvida uma aplicação em Matlab® que permite ao utilizador calibrá-lo, ver o erro de seguimento num dado instante e até deixar o sensor a armazenar dados, enquanto a estrutura está a fazer o seguimento, para um futuro tratamento. Este armazenamento de dados é feito numa folha de Excel®, onde é armazenada informação tal como o momento de cada medida, em coordenadas horárias (horas, minutos e segundos), e o erro de seguimento, em graus, para cada um dos dois eixos.

Para fazer o seguimento solar, propriamente dito, foi criado um sensor baseado em quatro fotoresistências. Este sensor demonstrou uma precisão na ordem de  $0.5^\circ$  num dia limpo.

### **5.2 Conclusão**

O seguimento feito à base de sensores de luz tem a desvantagem de ser sensível às condições atmosféricas, ou seja, pode ser difícil para o sensor de luz, num dia com muitas nuvens, alinhar-se correctamente com o sol e fazer um seguimento sem demasiadas oscilações. No entanto, foi desenvolvida uma protecção que visa minimizar os efeitos deste ponto fraco. Com esta protecção, a estrutura só se movimenta quando a fonte de luz é mais luminosa do que um limite definido. Tal decisão faz com que a estrutura só se mova quando o sensor capta irradiação directa, o que minimiza o número de oscilações mas, em dias mesmo muito cobertos, pode não ser capaz de seguir o sol satisfatoriamente, o que também não representa perdas significativas de produção.

No decorrer deste trabalho foi sendo feita referência aos aspectos que diferenciam os dois tipos de seguimento: o astronómico e o seguimento com base em sensores de luz. Com este trabalho fica

demonstrado que o seguimento com sensor de luz apresenta menos fontes de erro, comparativamente ao astronómico, o que faz com que este tipo de seguimento seja mais preciso, pelo menos em dias de céu limpo. Com o céu completamente coberto, o seguimento astronómico tem melhor desempenho pois, mesmo que tenha um ou dois graus de erro, o seguimento pode ser mais bem sucedido do que utilizando um sensor de luz. Com dias parcialmente cobertos, o seguimento com base em sensor de luz poderá ter um seguimento aceitável, uma vez que este, quando o sol aparece entre as nuvens, consegue alinhar-se perfeitamente.

### **5.3 Trabalho futuro**

No decorrer do trabalho foram sendo referidas vantagens e desvantagens associadas ao tipo de seguimento adoptado, nomeadamente, ao seguimento astronómico e ao seguimento através de sensor de luz. Visto que cada uma destas aproximações tem vantagens, seria interessante, como trabalho futuro, estudar um sistema que funcionasse com as duas tecnologias em simultâneo tirando partido das vantagens de cada uma, permitindo assim desenvolver um sistema muito robusto e preciso para seguimento solar.

Foi descrito todo o processo de desenvolvimento dos sensores até ao protótipo. No entanto é ainda necessário transformar os referidos protótipos em produtos que possam ser lançados no mercado.

O sensor desenvolvido necessita de ser utilizado por uma robótica de seguimento solar. No entanto, com o conhecimento adquirido, poderia criar-se todo o sistema de seguimento baseado no sensor e com baixo custo.

## 6. Bibliografia

- Abdallah, S., & Salem, N. Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Control and Management* , 1931-9. 2004.
- arduino. Obtido em Janeiro de 2010, de [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc). 2010.
- Bingol, O., Altinta, A., & Oner, a. Y. Microcontroller based solar-tracking system and its implementation. *Journal of Engineering Sciences vol.12* , 243-248. 2006.
- Castro, R. M. "*Introdução à energia fotovoltaica*". Instituto Superior Técnico. 2002.
- Choi, J., Kim, D., Park, C., & Chung, K. C. Design of Fuzzy controller based on PC for Solar Tracking System. *International Conference on Smart Manufacturing Application*. Kintex, Korea. 2008.
- Davis, M. Machine Vision as a Method for Characterizing Solar Tracker Performance. 2009.
- Department of Energy. Obtido em Janeiro de 2010 de [www.energy.gov](http://www.energy.gov).
- energias renovaveis. Obtido em Fevereiro de 2010, de [www.energiasrenovaveis.wordpress.com](http://www.energiasrenovaveis.wordpress.com).
- Greene, M., & Tan, H. *Solar Tracking: Design and Simulation*. Auburn University: Departement of Electrical Engineering. 1988.
- Huang, B. J., & Sun, F. *Feasibility study of one axis three positions tracking solar PV with low concentration ratio reflector*. Taiwan: Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University. 1996.
- Kalougirou, S. A. Design and construction of a one-axis sun-tracking system. *Solar Energy Vol.57* , 465-469.1996.
- Kurtz, S. *Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry*.2009.
- Lee, C., Chou, P., Chiang, C., & Lin, C. Sun Tracking Systems: A review. *Sensors* , 3875-3890. 2009.
- Liebe, C. Solar Compass Chip. *IEEE Sensors Journal* . 2004.
- Malvino. *Princípios de Electrónica*.2000.

Minor, M., & García, P. High- Precision Solar Tracking System. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. London, U.K. 2010.

Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., K, A., & Sharifi, A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 1800-1818. 2009.

Oliveira, M. Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal. Porto Alegre.2008.

Piprek, J. *Semiconductor Optoelectronic Devices*. University of California at Santa Barbara: Academic Press. 2003.

*Portal de moura*. Obtido em Setembro de 2010, de [www.portaldemoura.com](http://www.portaldemoura.com).

Quaschnig, V. *Understanding Renewable Energy Systems*. London: Earthscan.2005.

Ramage, J. "*Guia da Energia*". Monitor.2003.

*Responding to climate change*. Obtido em Outubro de 2010, de [www.rtcc.org](http://www.rtcc.org). 2009.

Roth, P., Georgiev, A., & Boudinov, H. Design and construction of a system for sun-tracking. *Renewable Energy* , 393-402. 2004.

Saleh, B. E., & Teich, M. C. *Fundamentals of Photonics*. J.W.Goodman. 1991.

Scherz, P. *Practical Electronics for Inventors*. McGraw-Hill. 2000.

Thomas Huld, M. S. Performance of single-axis tracking photovoltaic systems in Europe. (n.d.)

## **Anexos**

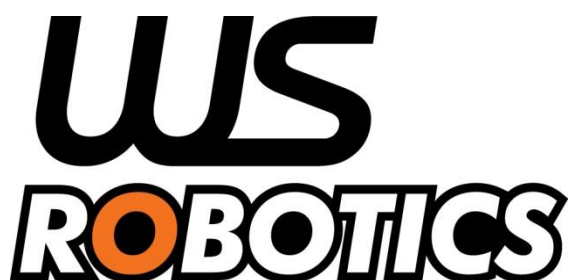




## **Anexo I**

### **Manual de instruções do sensor de precisão**





---

**WE POWER THE SUN**

---



# ***PRECISION LIGHT SENSOR***

User's Guide

## **Scope:**

Describe the operation procedures for the Precision Light Sensor Interface

<b>Prepared</b>	<b>Verified</b>	<b>Approved</b>
David Gomes 28.09.2010	Luís Pina 28.09.2010	Luís Pina 28.09.2010

**Objective:**

Describe the procedures for operating the interface of the Precision Light Sensor.

**Brief Description:**

The Interface of the Precision Light Sensor is a software with the following characteristics:

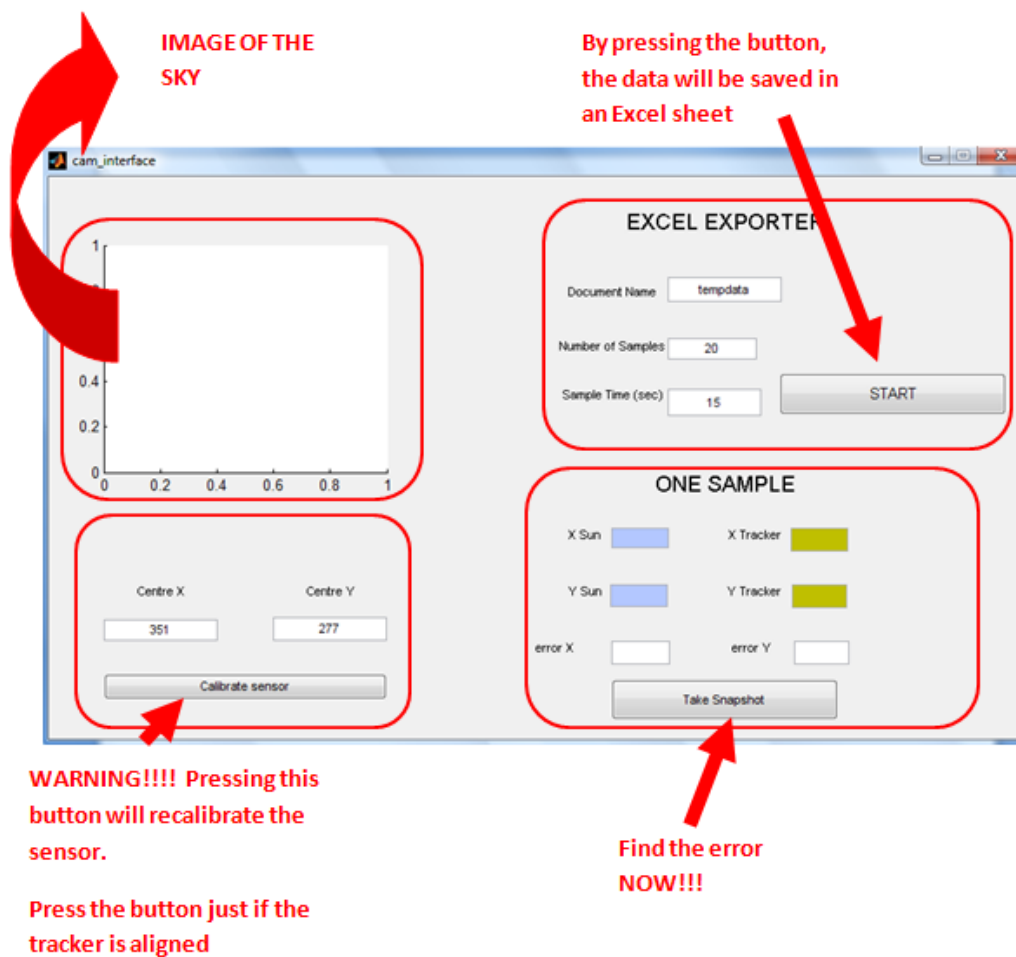
- Easy plug-and-play camera connection.
- Easy calibration.
- Easy determination of the tracking error.
- Possibility of saving data automatically in an Excel sheet.
- Real visualization of the sky, with two marked points: the center of the sun and the point where the system is pointing to.

To use this tool is required to connect the camera to a PC with a version of Matlab® with the Image Processing Toolbox installed.

To calibrate the sensor, after a necessary manual alignment of the tracker, the “Calibrate Sensor” button must be pressed.

It is also possible to find a real-time tracking error by pressing the “Take Snapshot” button. This button allows the user to see the image of the sky with the interesting points marked, as well as their position in pixels, and the tracking error, in degrees, of both axes.

A full test can be made by pressing the “Start” button. This function allows the user to choose the name of the Excel sheet in which is desired to save the data, as well as the number of samples and the time between each sample. The saved data consists on the time (hour, minute and second) of the snapshot moment, as well as the tracking error, in degrees.



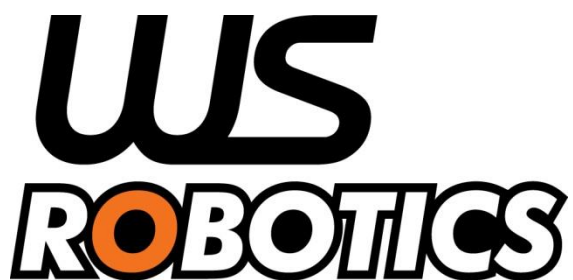


## **Anexo II**

### **Manual de instruções da placa de aquisição de dados**







---

**WE POWER THE SUN**

---



# ***DATA ACQUISITION BOARD***

User's Guide

## **Scope:**

Describe the operation procedures for the data acquisition board

<b>Prepared</b>	<b>Verified</b>	<b>Approved</b>
David Gomes 28.09.2010	Luís Pina 28.09.2010	Luís Pina 28.09.2010

**Objective:**

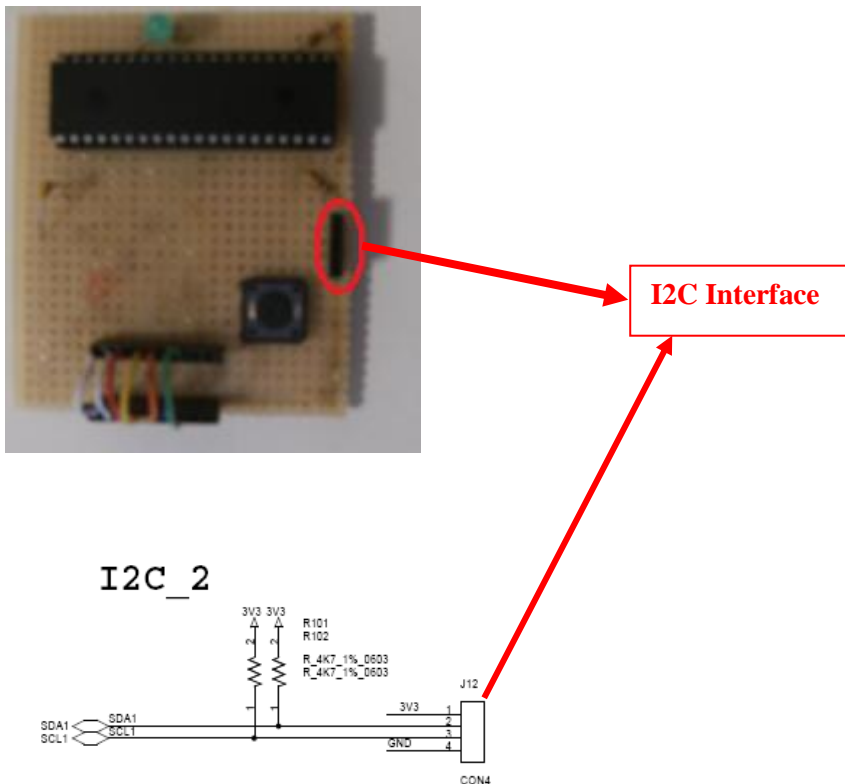
Describe the procedures for operating data acquisition board.

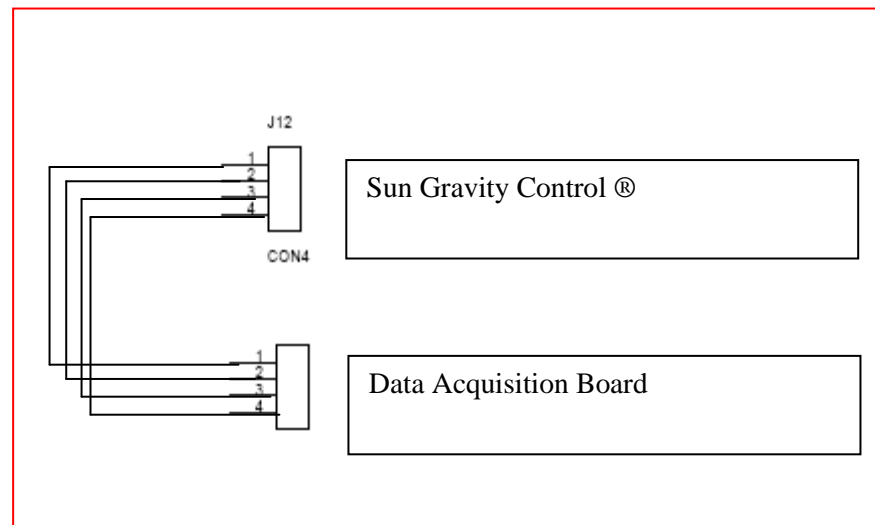
**Brief Description:**

The data acquisition board has the following characteristics:

- I2C communication
- Capacity for 8 inputs
- The sensors must have its output in voltage until 3.3V

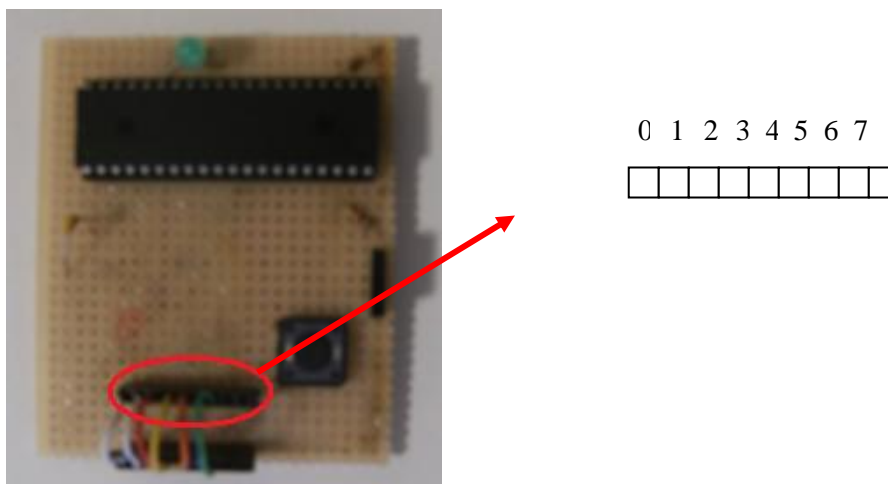
The aim of this product is to acquire data from several sensors, providing to the user, automatically, the voltage of each sensor. This tool has 8 sensor inputs and 4 I2C inputs/outputs.

**Connection to the WS-Energia Robotic:**



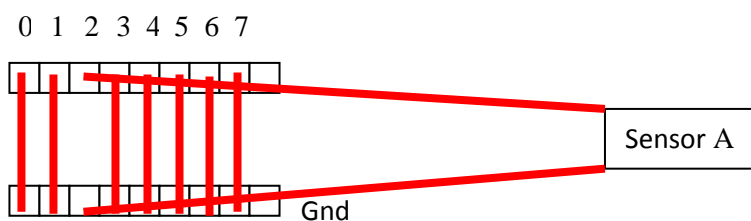
## Connection to the Sensors:

The following picture shows where the sensors must be connected.



The following picture shows an example where is desired to read the value of a sensor on the interface 2.

The other inputs shall be connected to GND as shown.





## **Anexo III**

### ***Comparison between astronomical and light sensor feedback sun-tracking algorithms***



# COMPARISON BETWEEN ASTRONOMICAL AND LIGHT SENSOR FEEDBACK SUN-TRACKING ALGORITHMS

David Gomes\*, Luís Pina\*\*, João Martins\*\*\*

\* Faculdade de Ciências e Tecnologia, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal.{davidcoimbragomes@gmail.com}

\*\*WS-Energia, Taguspark Edifício Tecnologia II, Pavilhão 46, 2740-257 Porto Salvo, Portugal.{pina@ws-energia.com }

\*\*\* CTS, Uninova, Dep.º de Eng.ª Electrotécnica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal.{jf.martins@fct.unl.pt}

**Abstract:** This paper compares the performance of two different Sun-tracking algorithms; the light sensor feedback approach and the astronomical calendar approach. These are the two most popular approaches for Sun-tracking algorithms, and their performance in terms of accuracy and robustness to exogenous interactions is compared. The error propagation chains are analyzed and compared to identify the sources of Sun-tracking errors and system brake-downs. Several examples show the behavior of the Sun-tracking algorithms under nominal working conditions and extremely harsh conditions. Conclusions are drawn in terms of the applicability of both Sun-tracking approaches.

**Keywords:** Sun-tracking, light sensor, image processing, photovoltaic.

## 1. INTRODUCTION

The performance of a photovoltaic application depends, among other features, on the amount of solar energy captured by the photovoltaic cells (Kalougrirou, 1996) (Mouzadeh, 2008).

In fact, in order to maximize the amount of solar energy captured by the photovoltaic cells, much importance has been given to systems able to track the sun. These systems are called sun-tracking systems and have been showing great results when compared to static systems. (Lee, 2009).

Studies show that a dual-axis tracking system can improve the amount of energy collected in about 40% when compared to static systems (Mouzadeh, 2008).

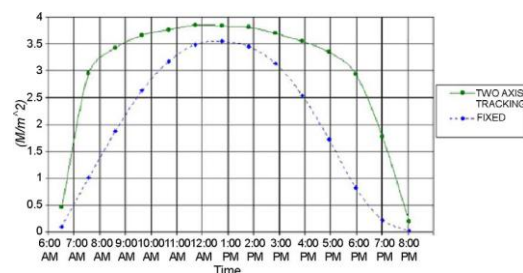


Figure 1: Comparison between a dual-axis tracking system and a static one (Abdallah, 2003).

In order to track the sun accurately, there are two popular approaches:

- The astronomical tracking
- The light sensor-based tracking

The astronomical tracking is a common way to track the sun, using known information about the sun's position, like geographical and time coordinates. In this approach,

it is necessary to solve equations to find the optimal position, at each moment, of the tracker.

The light sensor-based tracking is also a common way to track the sun. It is a much simpler and economic way to track the sun. In this approach, it is usual to use photosensitive devices like photoresistors, phototransistors or photodiodes.

In this paper, it will be possible to conclude that the light sensor approach has much less influence of construction and implementation errors when compared to the astronomical approach.

To compare the two approaches, two light sensors were developed. The first one, an accurate sensor, based on a webcam, was built to evaluate the accuracy of the tracking system. On the other hand, the main aim of the other sensor, based on the comparison of the amount of light received by four photoresistors, is to track the sun.

## 2. DEVELOPMENT OF A PRECISION SENSOR

To the development of a precision sensor, a webcam Genius eFace 1300 was used (Figure 2)



Figure 2: Webcam used to develop the sensor

The main scope of this sensor is to evaluate the accuracy of the sun-tracking system.

As it can be seen on the Figure 3, the sensor captures an image of the sky, finds the center of the sun and marks it on the image (green point). On the other hand, it also marks the point where the system is pointing to (red point).



Figure 3: Image of the sky with the two points marked.

The point where the system is pointing to is the center of the image, if the sensor is perfectly aligned with the tracker. It is known that the screen has 640x480 pixels; so the center of the image is the point (320; 240). On the other hand, the center of the sun is found applying a simple image processing to the picture of the sky. It is the centroid of the component that corresponds to the sun, in the binary image.

To avoid the saturation of the camera or, in other words, the fact that the screen becomes completely white, a solar filter is used. The use of this filter has shown to be very useful also for the performance of the sensor software, in the way that it filters almost all the image except the sun, which is, exactly, the desired.

Knowing the point where the system is pointing to (red point) and the center of the sun (green point) it is possible to find the tracking error of the system, in pixels (Figure 4). To know the tracking error in degrees, as desired, a simple matching was done.

It was found that 51 pixels correspond to  $3.69^\circ$ . So, assuming linearity in all the image, which is not completely true, it can be concluded that 1 pixel correspond to  $0.07^\circ$  or, in other words, this sensor has a precision of 0.07 degrees.

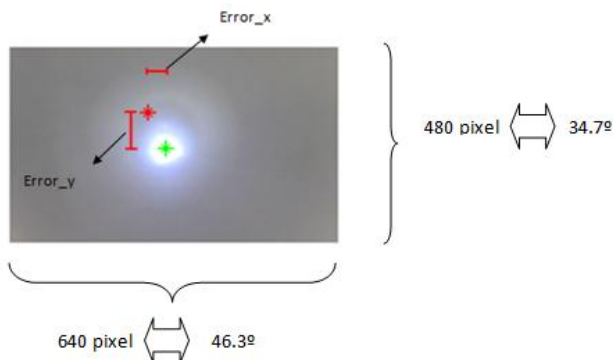


Figure 4: Illustration of tracking error in both axes.

From the Figure 4, it is also visible the range of the sensor,  $34.7^\circ$  in the vertical axis and  $46.3^\circ$  on the horizontal one. If the sun is out of the range of the sensor, or behind some clouds, it cannot be found.

### 3. DEVELOPMENT OF A LIGHT SENSOR

To develop a light sensor to track the sun in two axes, it was decided to use four photo-sensitive devices of a kind to compare the amount of light in each pair. The scope of this comparison consists on the fact that, if the device E and W are receiving the same amount of light, the sensor is well oriented to the sun in the E-W axis. Otherwise, the tracker shall turn to the side of the device that is receiving a bigger amount of light. To the axis N-S, the idea is exactly the same. So, if the four devices are receiving the same amount of light, the sensor is perfectly aligned (Figure 5).

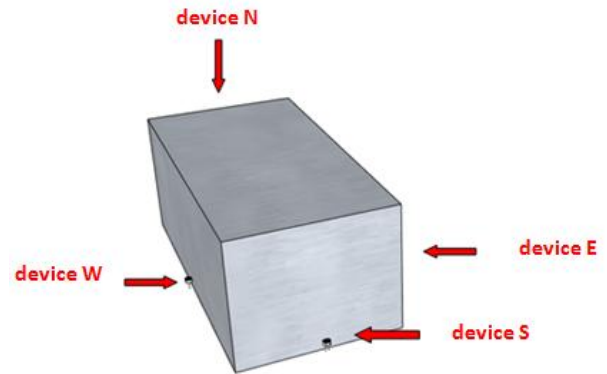


Figure 5: Illustration of the sensor.

In order to choose the best device to integrate the sensor, several tests were made. The photo-sensitive devices commonly used in this kind of applications are photoresistors (LDR's), photodiodes and phototransistors. One of the tests consisted on the comparison of the three referred devices when illuminated by a 120W lamp with adjustable intensity as shown in the Figure 6.



Figure 6: Picture of the test.

The test consisted on acquiring data from the three devices, simultaneously, from the luminosity of a dark room to the maximum of the lamp and then back to the dark.

By the ease of the assembly, it was chosen to use a voltage divider to read the value acquired by each device, as shown in the Figure 7.



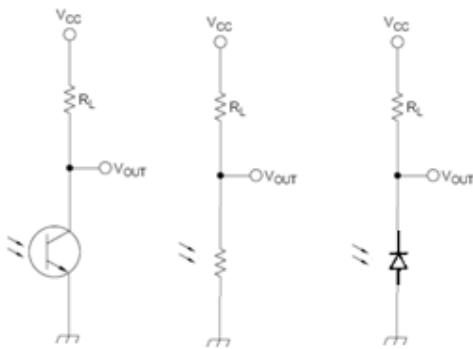


Figure 7: Assembly of the three devices.

In order to read the value of the luminosity acquired by each device, it was used an Arduino®, a single-board microcontroller and a software for programming it. This tool uses a 10 bit analog-to-digital converter (ADC), which means that, when the device has no incident light at all will correspond to a value of 1023. On the other hand, a value of 0 will correspond to the maximum amount of light the device can read.

To better understand the range of the amount of light, the following table is presented (Table 1), where two values are compared: an assembly with a photoresistor and a 1K $\Omega$  resistor, and the value given by the light meter.

LDR value	Light Meter (LUX)
80	98 000
180	90 000
350	23 000
600	1000
800	280
1000	30
1023	0



Table 1: Matching values of luminosity.

A value of 0 was never reached with this assembly, which means that a range is left for higher values of luminosity. These values (Table 1) can be calibrated by modifying the value of  $R_L$  (Figure 7). This calibration shall be done in order to choose the best range of values. In this application, it's known that the desired, is to make a system capable of detecting a range of illumination from 0 LUX (absolute dark) to the value corresponding to the higher value of illumination of the sun, about 100 000 LUX.

As it can be seen in the Figure 8, Figure 9 and Figure 10, three values of  $R_L$  were tested in order to find the best resistor to integrate the voltage divider.

After testing three different values of  $R_L$  linked to each one of the devices, it was possible to choose the device to integrate the sensor, as well as its value of the associated resistor  $R_L$ .

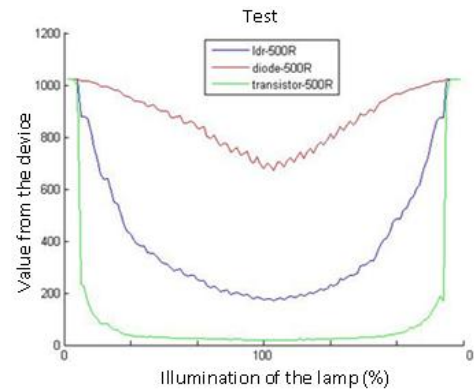


Figure 8: Test with 500 $\Omega$  resistors.

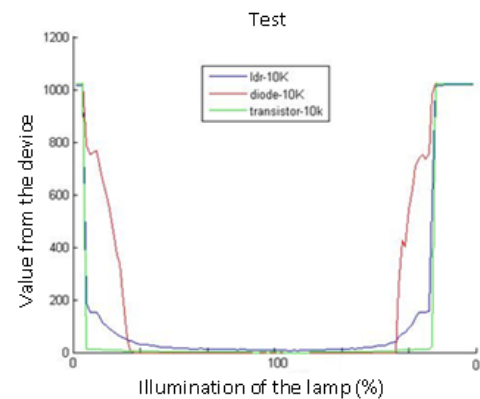


Figure 9: Test with 10K $\Omega$  resistors.

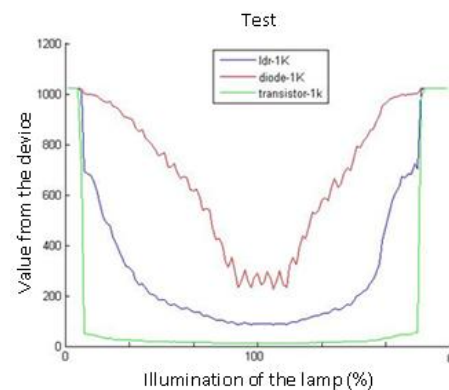


Figure 10: Test with 1K $\Omega$  resistors.

Watching the Figures 8-10 carefully, it is remarkable that the response of the photodiode (red line) is too oscillatory and the response of the phototransistor (green line) is too abrupt for every value of  $R_L$ . The photoresistor (blue line), on the other hand, has a good response. It is now necessary to choose a value of  $R_L$ . By watching the test with  $R_L = 10K\Omega$ , the value of the photoresistor becomes 0 when a big amount of light is left, it is not sensible for values where the amount of light is bigger. Between the values of  $R_L = 500\Omega$  and  $R_L = 1K\Omega$ , the difference isn't much. It was decided to use the value of  $R_L = 1K\Omega$  because its amplitude is a bit higher, which means that it senses a bigger range of light.

Chosen the devices and the resistors, the sensor is ready to be made, as it can be seen in the Figure 11.



Figure 11: Picture of the sensor.

To build this sensor, the PIC 18F4420 was used and its communication with the robotics of the system is done by the I2C protocol. A simplified scheme is shown in the Figure 12.

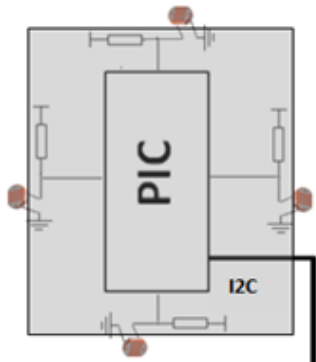


Figure 12: Simplified Scheme of the sensor.

#### 4. THEORICAL COMPARISON BETWEEN ASTRONOMICAL AND LIGHT SENSOR APPROACHES

##### 4.1 Astronomical approach

The astronomical approach is based on the information of a gravity sensor. This sensor is supposed to point to the center of the planet. However, there are some possible errors associated to the use of this sensor. As it can be seen on the Figure 13, if there is, for example, a big rock nearby, it can induce errors on the measurement of the sensor.

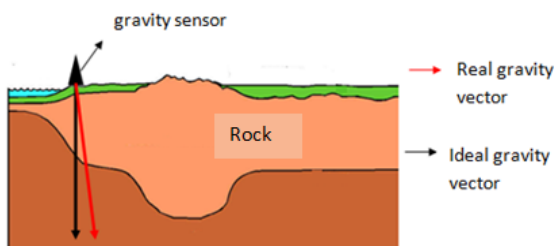


Figure 13: Error associated to the use of gravity sensor.

Other sources of error, hard to suppress, are the orientation of the structure itself and the position of the robotic box, which contains the gravity sensor. These errors are illustrated on the Figure 14.

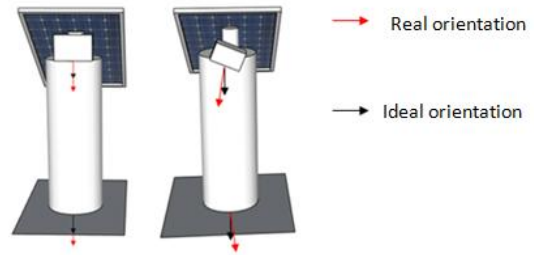


Figure 14: Errors associated to the implementation of the system.

Associated to the calendar, clock and the equations, there are also possible errors. As it can be seen in the Figure 15, there are several possible errors that can lead to a bad accuracy of the tracker.

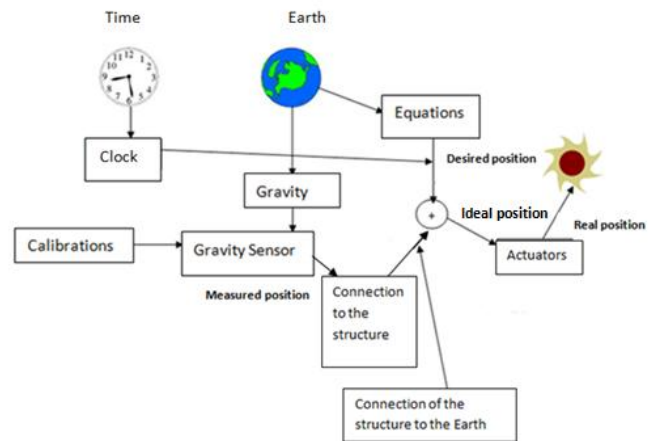


Figure 15: Error propagation chain of the astronomical approach.

The desired position can be found by solving equations with information from the clock. As it was already said, this calculation may not be perfect. The measured position of the tracker is an information from the gravity sensor and, as already told, it has several errors associated, like the orientation of the structure, the orientation of the gravity sensor and the geology of the place where the system is assembled. Knowing the desired position and the measured position of the tracker, the position where the tracker should be oriented to (ideal position) can easily be found. However, the actuators have errors as well; so, the orientation calculated as the perfect one, may not be achieved.

It can be concluded that the astronomical approach may not track the sun perfectly because of errors from:

- Geology of the place
- Position of the tracker relatively to the surface of the Earth
- Position of the robotic box (gravity sensor) relatively to the tracker

- Clock, calendar, equations
- Actuators

#### 4.2 Light sensor approach

The light sensor approach is a system uniquely based on information received from the sensor. It is a very simple system that works by the comparison of the values of luminosity of each photosensitive device, as it can be seen on the Figure 5.

The error propagation chain, in this case, is much less comparing to the previous approach. In this case, the desired position is obtained directly by the sun, without the need of solving equations or reading the gravity sensor. The main error source is the assembly between the sensor and the structure. However, this error can be reduced if the sensor assembles the tracker with a flat surface, which really happens, as can be seen in the Figure 16.

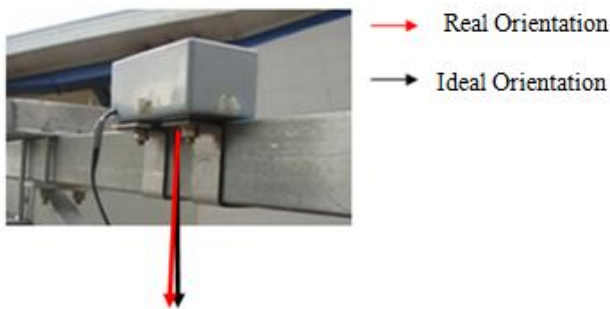


Figure 16: Possible assembly error.

The errors associated to the actuators don't matter in this approach, because the sensor is always "looking" to the sun; so, if the real position isn't equal to the desired, the actuators shall be actuated. So, in the Figure 17, where the error propagation chain of the light sensor approach is illustrated, there is no need to distinguish between the real and ideal position. It can be just called "position" of the tracker (in red).

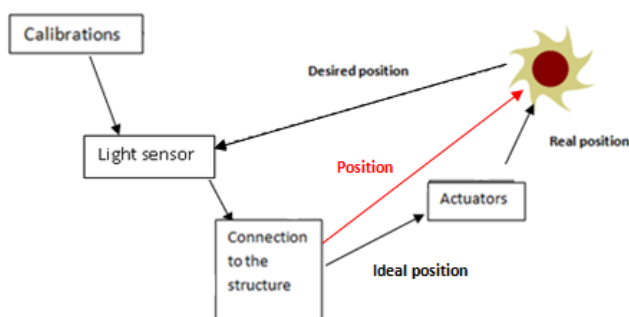


Figure 17: Error propagation chain of the light sensor approach.

Another possible error comes from a possible error in the calibration of the photo-sensitive devices. All the devices are different so, much attention has to be given to the calibration. Without a careful calibration, two different devices, being equally illuminated, may output a different value of luminosity, which will lead to a bad accuracy of the sensor. For these reasons, much attention has to be given to the calibration of the devices and assembly of the sensor in the tracker.

For these reasons, it can be concluded that the light sensor approach may not track the sun perfectly because of errors from:

- Calibration of the photo-sensitive devices
- Assembly of the sensor on the tracker

#### 4.3 Error sources comparison

As previously shown, the astronomic approach has much more error sources than the light sensor approach. To resume it, the Table 2 is presented.

Astronomic Approach	Light sensor Approach
-Geology of the place.	
-Position of the tracker relatively to the surface of the Earth.	-Calibration of the photo-sensitive devices.
-Position of the robotic box (gravity sensor) relatively to the tracker.	-Assembly of the sensor on the tracker.
-Clock, calendar, equations.	
-Actuators.	

Table 2: Error sources comparison.

The fact of having much sources of error (Table 2), a good tracking accuracy using the astronomical approach will be very difficult to achieve.

#### 5. PRATICAL COMPARISON BETWEEN ASTRONOMICAL AND LIGHT SENSOR APPROACHES

Several tests were made in order to understand the advantages and disadvantages of each type of tracking. In the Figure 18, it's possible to see the path of the sun, given by the astronomical approach (green line). It's also visible the path of the tracker (blue line). The red points are the errors given by the developed precision sensor, in every ten seconds, relatively to the real position of the tracker (blue line).

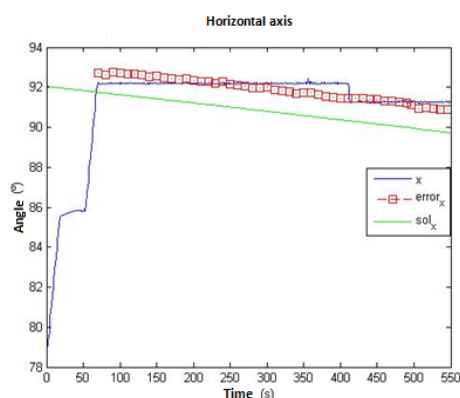


Figure 18: Test made with the sun shining (horizontal axis).

It's easy to deduce that the real path of the sun isn't the green line, as the astronomical approach says, but it's a line that passes in all points given by the precision sensor. The real path of the sun is, approximately, the black line of the Figure 19. As it can be seen, the tracker, working with the light sensor, tracks the sun quite well with a maximum deviation of  $0.6^\circ$ .

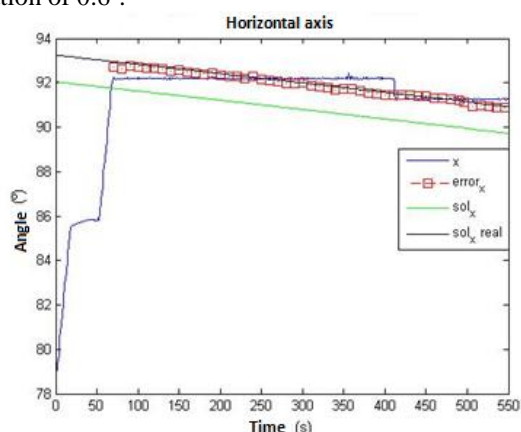


Figure 19: Test made with the sun shining with the real path of the sun (horizontal axis).

The same procedure has been done to the vertical axis, as can be seen in the Figure 20.

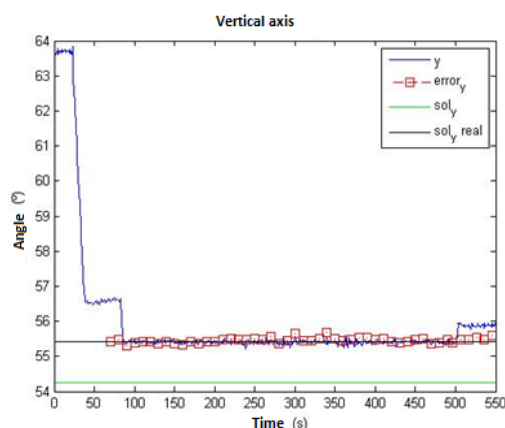


Figure 20: Test made with the sun shining with the real path of the sun (vertical axis)

After this test, it's possible to say that, when the sun is visible and there aren't many clouds, the light sensor approach can have a better accuracy than the astronomical one.

The advantage of the light sensor is the fact that it is able to "watch" the sun. But, is it also better when the sun is no longer visible? The answer is: obviously not.

Several tests were made in order to find the accuracy in cloudy days. As it can be seen in the Figure 21 and Figure 22, that shows the behaviour, in a cloudy day, of the tracker (blue line) and the path of the sun given by the astronomical approach (red line) in both axes, it's possible to say that the light sensor isn't very robust for these situations. It's true that the path of the sun in the figures isn't the real one but the path given by the astronomical approach. However, it is also true that the real path and the one given by the astronomical approach are not very different.

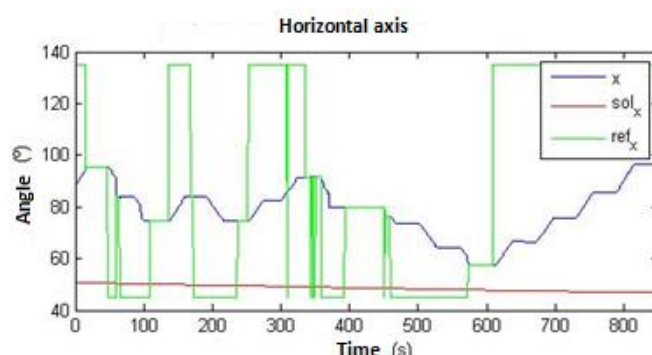


Figure 21: Test made in a cloudy day (horizontal axis)

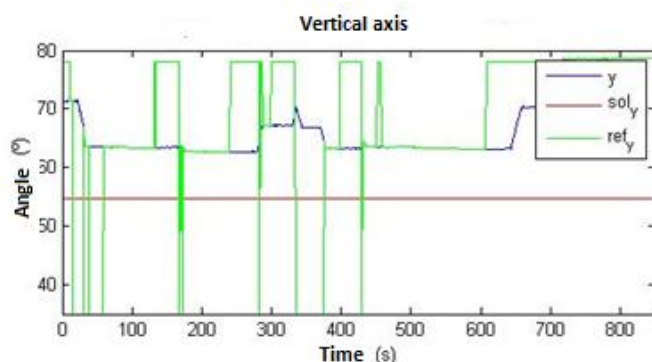


Figure 22: Test made in a cloudy day (vertical axis)

After this test it's possible to conclude that the light sensor, in cloudy days, is far from being perfect. It moves to the direction where the amount of illumination is higher; but this direction, in cloudy days, is always changing, which makes these movements too frequent, as it can be seen in the Figure 21.

There are some techniques to avoid the frequent move of the actuators, by moving just when the amount of illumination is higher than a certain value. Its performance increases but, comparing to the astronomical approach, the tracking error might be higher.

## 6. OTHER SYSTEMS

Several sun-tracking systems were made using several different technologies and, as it can be seen in the Table 3, better accuracies can be reached when the light-sensor tracking is used.

Approach	Precision (degrees)	Author
Light-sensor	0.05-0.2	Kalogirou S.A.
Light-sensor	0.1	Lynch W.A., Salameh Z.M.
Astronomical	2	Davies P.A.
Astronomical	10	Khlaichom P., Sonthiermpoon K.

Table 3: Comparison between the two approaches

## 7. CONCLUSIONS

Both astronomical and light sensor based approaches have advantages and disadvantages.

There are many sources of error, when using the astronomical approach, which makes the accurate tracking very difficult to do. It is good enough when applied to PV systems which are not very critical in terms of accuracy.

When the aim is to be applied to concentrating systems, which require about a half degree of accuracy, the use of a light sensor is preferable. These systems can easily achieve this range of accuracy, as long as it is used in days where the clouds are not, frequently, in front of the sun.

## REFERENCES

- Abdallah, S. (2003). *Two axis sun tracking system with PLC control*.
- Davies PA. (1993). *Sun tracking mechanism using equatorial and ecliptic axes*.
- Kalogirou. (1996). *Design and construction of a one-axis sun-tracking system*.
- Khlaichom P, Sonthiermpoon K (2006). *Optimization of solar tracking system based on genetic algorithms*.
- Lee, C. (2009). *Sun tracking systems: A review*.
- Lynch WA, Salameh ZM (1990). *Simple electro-optically controlled dual-axis sun-tracker*.
- Mouzadeh, H. (2008). *A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output*.

